工程软件高速加工实例详解





Cimatron E9.0 数控高速加工实例详解

李万全 高长银 郭向东 黎胜容 主编





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

基础知识够用
实例丰富，讲解透彻，可借鉴性强
学习后可轻松实现从入门到精通



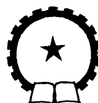
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

工程软件高速加工实例详解

Cimatron E9.0 数控高速加工实例详解

李万全　高长银　郭向东　黎胜容　主　编



机　械　工　业　出　版　社

本书基于 Cimatron E9.0 软件平台，以实际项目为背景，结合大量典型实例，深入浅出地介绍了 Cimatron E9.0 数控高速加工的原理和实际应用。全书共 5 章，第 1、2 章为基础知识，简要介绍了高速加工机床的结构、工艺以及 Cimatron E9.0 高速加工技术；第 3～5 章为高速加工实例，从专业应用的角度出发，分别介绍了 Cimatron E9.0 三轴、四轴和五轴加工实例；实例安排从入门到提高，循序渐进，代表性和针对性强。

本书含光盘一张，包括书中所有实例素材文件和视频操作演示，方便读者使用。

本书适合数控加工人员使用，同时也可作为大中专院校相关专业学生的理想教材，是读者学习高速加工的必备参考书。

图书在版编目（CIP）数据

Cimatron E9.0 数控高速加工实例详解/李万全等主编．—北京：机械工业出版社，2011.12
（工程软件高速加工实例详解）
ISBN 978-7-111-36683-6

Ⅰ．①C… Ⅱ．①李… Ⅲ．①数控机床—程序设计—应用软件，Cimatron E9.0 Ⅳ．①TG659-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 250835 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：周国萍 责任编辑：周国萍 郑 铉
责任校对：李 婷 封面设计：马精明
责任印制：乔 宇
三河市国英印务有限公司印刷
2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm・20.5 印张・397 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-36683-6
ISBN 978-7-89433-304-9（光盘）
定价：49.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销 售 一 部 ：（010）68326294
销 售 二 部 ：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

策划编辑（010）88379733
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

前　言

本书创作背景

高速加工是一门先进的切削技术。与普通加工技术相比，高速加工具有非常快的切削速度和进给速度，不仅可使用户提高加工效率，缩短加工时间，而且还可获得较高的加工精度。因此随着制造业技术的不断发展，高速加工逐渐得到了广泛的应用。市场上关于高速加工的同类书比较少，为了弥补这种不足，本书基于常用的 Cimatron E9.0 平台，结合大量典型实例，讲解数控高速加工编程的方法与应用技巧。

本书内容导读

全书内容共分为 5 章，具体内容如下：

第 1 章为高速加工的专业知识，简要介绍了高速加工的特点和应用、机床结构与分类、加工刀具的材料和结构以及高速加工的工艺。读者通过学习，将对高速加工技术有一个入门性的了解。

第 2 章介绍了 Cimatron E9.0 高速加工的主要技术，包括三轴高速加工技术、四轴高速加工技术、五轴高速加工技术。为了读者加深理解和巩固知识，在重点介绍加工操作方法和参数设置的同时，还结合实例讲解，读者通过学习，将具备扎实的操作技术，为后面的实例学习打下基础。

第 3～5 章介绍了 Cimatron E9.0 高速加工典型实例，包括：三轴高速加工实例 3 个（凹台零件高速加工、台灯灯罩凹模高速加工、按摩器外壳模具高速加工），四轴高速加工实例 3 个（大导程螺杆四轴高速加工、衣模四轴高速加工，叶片四轴高速加工），五轴高速加工实例 3 个（瓶身模具高速加工、航空器零件高速加工、倒扣方盒零件高速加工）。实例类型丰富，学习难度从入门到提高，代表性和指导性强，方便读者学习后举一反三，实现从入门到精通。

本书主要特点

归纳起来，本书主要特点有：

1）内容安排：专业知识→Cimatron E9.0 高速加工技术→典型应用实例，技术理论为辅，工程实践为主，集专业性和实用性于一体。

2）讲解方式：循序渐进、深入浅出，无论读者是否具有高速加工基础，都

可以轻松入门与提高，最终学以致用。

3）本书光盘：提供全书所有实例操作的视频演示，手把手指导读者练习。

本书读者对象

本书面向数控行业的初、中级用户，既适合数控加工人员使用，同时也可作为大中专院校相关专业学生的理想教材，是读者学习高速加工技术与应用的案头宝典。

本书作者队伍

本书由李万全、高长银、郭向东、黎胜容主编，参加编写的还有黎双玉、马龙梅、涂志涛、刘红霞、刘铁军、何文斌、邓力、王乐、杨学围、张秋冬、闫延超、董延、郭志强、毕晓勤、贺红霞、史丽萍、袁丽娟、刘汝芳、夏劲松。

由于时间有限，书中难免会有一些错误和不足之处，欢迎广大的读者及业内人士予以批评指正。

作　者

2012 年 3 月

目　　录

前言

第1章　高速加工的专业知识……1

1.1　数控高速加工基础……1

1.1.1　高速加工的特点和应用……2

1.1.2　高速加工机床的结构与分类……4

1.1.3　高速加工刀具的材料和结构……16

1.2　数控高速加工工艺……25

1.2.1　高速加工的工艺特点……25

1.2.2　高速加工切削用量的选择……27

1.2.3　高速加工路径规划……31

1.3　本章小结……34

第2章　Cimatron E9.0高速加工技术……35

2.1　Cimatron E9.0三轴高速加工技术……35

2.1.1　体积铣……35

2.1.2　曲面铣……59

2.1.3　局部精细加工概述……79

2.2　Cimatron E9.0四轴高速加工技术……85

2.2.1　局部操作四轴加工……85

2.2.2　轮廓铣四轴加工……97

2.3　Cimatron E9.0五轴高速加工技术……100

2.3.1　航空铣……100

2.3.2　五轴侧刃铣……125

2.4　本章小结……132

第3章　Cimatron E9.0三轴高速加工实例……133

3.1　入门实例——凸台零件高速加工……133

3.1.1　实例描述……133

3.1.2 加工方法分析 …… 133
3.1.3 加工流程与所用知识点 …… 134
3.1.4 具体操作步骤 …… 136
3.1.5 实例总结 …… 152
3.2 提高实例——台灯灯罩凹模高速加工 …… 152
3.2.1 实例描述 …… 152
3.2.2 加工方法分析 …… 152
3.2.3 加工流程与所用知识点 …… 153
3.2.4 具体操作步骤 …… 155
3.2.5 实例总结 …… 169
3.3 经典实例——按摩器外壳模具高速加工 …… 169
3.3.1 实例描述 …… 169
3.3.2 加工方法分析 …… 170
3.3.3 加工流程与所用知识点 …… 170
3.3.4 具体操作步骤 …… 173
3.3.5 实例总结 …… 192
第 4 章 Cimatron E9.0 四轴高速加工实例 …… 193
4.1 入门实例——大导程螺杆四轴高速加工 …… 193
4.1.1 实例描述 …… 193
4.1.2 加工方法分析 …… 194
4.1.3 加工流程与所用知识点 …… 194
4.1.4 具体操作步骤 …… 197
4.1.5 实例总结 …… 208
4.2 提高实例——衣模四轴高速加工 …… 209
4.2.1 实例描述 …… 209
4.2.2 加工方法分析 …… 209
4.2.3 加工流程与所用知识点 …… 209
4.2.4 具体操作步骤 …… 211
4.2.5 实例总结 …… 224
4.3 经典实例——叶片四轴高速加工 …… 224
4.3.1 实例描述 …… 224

4.3.2　加工方法分析 ······ 224
4.3.3　加工流程与所用知识点 ······ 225
4.3.4　具体操作步骤 ······ 226
4.3.5　实例总结 ······ 238

第 5 章　Cimatron E9.0 五轴高速加工实例 ······ 239

5.1　入门实例——瓶身零件五轴高速加工 ······ 239
5.1.1　实例描述 ······ 239
5.1.2　加工方法分析 ······ 239
5.1.3　加工流程与所用知识点 ······ 240
5.1.4　具体操作步骤 ······ 242
5.1.5　实例总结 ······ 255
5.2　提高实例——航空零件五轴高速加工 ······ 255
5.2.1　实例描述 ······ 255
5.2.2　加工方法分析 ······ 256
5.2.3　加工流程与所用知识点 ······ 256
5.2.4　具体操作步骤 ······ 260
5.2.5　实例总结 ······ 288
5.3　经典实例——倒扣方盒零件五轴高速加工 ······ 288
5.3.1　实例描述 ······ 288
5.3.2　加工方法分析 ······ 289
5.3.3　加工流程与所用知识点 ······ 290
5.3.4　具体操作步骤 ······ 294
5.3.5　实例总结 ······ 318

参考文献 ······ 319

第 1 章　高速加工的专业知识

高速加工是相对于常规加工而言的一种技术。国内外机构对于高速加工的描述各有不同，分别如下：

① 国际生产工程科学院 CIRP 切削委员会在 1978 年提出，线速度在 500～7000m/min 的切削加工为高速加工。

② 德国 Darmstadt 工业大学生产工程与机床研究所 PTW 提出，以高于普通切削速度 5～10 倍的切削加工为高速加工。

③ 对铣削加工而言，从刀具夹持装置达到平衡要求时的速度来定义高速加工，ISO1940 提出主轴转速超过 8000r/min 为高速加工。

④ 从主轴设计的角度，以沿用多年的主轴转速特征值 DN 值来定义高速加工，DN 值在（5～15）$\times 10^5$mm·r/min 时为高速加工。

⑤ 从主轴和刀具的动力学角度来定义，它取决于刀具振动的主模式频率，在 ANSI/ASME 标准中，在进行切削性能测试时，以此选择转速范围。

本章将首先介绍高速加工的专业知识，包括高速加工的特点、高速加工机床、高速加工刀具以及高速加工工艺，使读者对高速加工的基础知识有所了解。

1.1　数控高速加工基础

高速加工与普通加工有很大的不同，具体的如表 1-1 所示。

表 1-1　高速加工与普通数控加工的区别

项　　目	普通数控加工	高 速 加 工
主轴转速	一般不超过 6000r/min	约 10000r/min 以上
进给速度	一般不超过 10m/min	30～100m/min
加工余量	小于刀具半径	（0.1～0.2）刀具半径
切削力	大	小
运动传递方式	轴、齿轮	电主轴
刀具材料	普通刀具材料	超硬刀具材料
加工质量	一般	较好（*Ra*0.4μm）
加工时间	长	短
机床	普通机床（国产）	高速切削机床（进口）
机床价格	较低	较高
工艺流程	粗、半精、精、清根加工	粗、精加工

高速加工英文全称 High Speed Machining（HSM）或 High Speed Cutting（HSC）。一般认为，高速加工是指采用比常规切削速度和进给速度高得多（一般要大于 5～10 倍）的速度来进行高效加工的先进制造技术。高速加工一般采用高的主轴转速、高的进给速度、较小的背吃刀量，其切削速度伴随刀具材料的超硬耐磨性的发展而不断提高。现阶段，一般把主轴转速在 10000～20000r/min、进给速度在 30～100m/min 范围的切削加工归纳为高速加工。

1.1.1　高速加工的特点和应用

1．高速加工的特点

高速加工的特点主要有下面四点：

（1）减少机加工时间，获得高的加工效率　高速加工提高了切削速度和进给速度，使单位时间内金属材料的切除率增大，减少了加工时间。高速加工的精加工材料去除速度是常规加工的 4 倍以上；高速加工的粗加工材料去除率也可达到 $45cm^3/min$ 左右。此外，高速加工一般只需要进行粗、精加工，半精加工和清根加工可以省略，简化了工艺方案，机加工设备种类也有所减少。常规铣加工不能加工淬火后的材料，淬火变形必须人工修整或通过放电加工解决。高速加工可以直接加工淬火后的材料，省去了放电加工工序，消除了放电加工所带来的表面硬化问题，减少或免除了人工光整加工。由于高速加工采用极小的背吃刀量和小的切削宽度，所以可使用更小的刀具加工细小的凹圆角和精细结构，从而免除了其他加工工序，减少了钳工的修整工作。在模具制造工业，高速加工为修模工作带来极大方便，以前只能由放电加工解决的修模工作，现在可以由高速加工利用原有的 NC 程序来准确无误地直接完成，不需要再编程。

（2）获得高的加工精度和表面质量　高速加工可以得到高质量的加工表面。由于高速加工采用极小的背吃刀量和小的切削宽度，因此可以得到高质量的加工表面，节省人工修光工序和放电加工工序。

1）高速加工时，背吃刀量很小，对同样的切削层，表现为切削力下降，工件变形减小。

2）由于高速加工的切削速度高，对工件的切削时间短，大量的切削热来不及传导，就随切屑排出，切削温度下降，工件的热变形小，仅受一次热冲击，工件表面损伤轻，使得表面粗糙度值降低，可保持良好的表面力学性能，呈压应力状态。

3）高速加工时，与主轴转速相关的激振频率远远高于工艺系统的固有频率，对切削加工不利的振动等被减弱。

（3）高速加工可以加工薄壁零件　由于高速加工采用极小的背吃刀量和切削宽度，因此切削力较小，可以加工细长零件和薄壁零件。此外，高速加工时，随着切削

速度的提高，切削剪切区温度升高，工件材料软化，材料屈服强度降低，使得单位切削力下降。因此，高速加工在航空工业中可成功切削厚度为 0.1mm 的铝薄壁件。

（4）加工环境友好　在一些特种加工（如模具制造）中，型面加工多采用电加工。由于电加工会产生一些有害气体和烟雾，生产效率也不高，这同目前低能耗、与环境协调的绿色加工的发展方向不一致，所以用高速铣削加工来代替特种加工是模具制造业的一个发展方向。高速加工可以获得较好的表面质量（表面粗糙度值 *Ra* 可达到 0.4μm），这不仅可省去电火花加工后的磨削、抛光等工序，而且在工件表面上可形成压应力，提高模具的寿命。

2．高速加工的应用

高速加工是一项高新技术。它的基本特征为三高：高效率、高精度和高表面质量，因此在航空工业、汽车工业、模具工业和精密制造业等行业中的应用比较多。

1）航空工业是高速加工的主要应用行业，例如飞机上的一些零件为了提高可靠性和降低成本，采用整体制造法，将原来由多个铆接或焊接而成的部件改成整体实心材料制造。有些整体构件的材料去除率高达 90%，而其中许多零件为薄壁、细肋结构，有的厚度甚至不到 1mm。由于刚度差，不允许有很大背吃刀量，因此高速切削成为此类零件加工工艺的唯一选择。采用高速切削加工可大大提高生产效率，降低成本。

此外，飞机材料中的难加工材料（如钛合金、高温合金及高强度合金），其切削加工性能差，普通加工只能采用低速切削，制造和应用都受到限制；采用高速加工后，切削力减小，切削热大部分都被切屑带走，工件温度不高，制造难度下降。

2）现代汽车产品的样式越来越多样化，汽车产品的换型也越来越快，由原来单一工件的大批量生产变成了由多种工件较小批量叠加成的大批量生产。在汽车制造工业中占统治地位的组合机床自动线虽然效率高，但却无法满足汽车行业快速更新的要求；而以高速加工技术为基础的敏捷柔性自动生产线被越来越多的国内外汽车制造厂家所采用，例如美国 GM 发动机总成工厂的高度柔性自动生产线、福特汽车公司和 Ingersoll 机床公司合作研制以 HVM800 卧式加工中心为主的汽车生产线。大批量生产的汽车行业面临产品快速更新换代而形成的多品种生产线来代替组合机床生产线，高速加工中心则将柔性生产的生产速度提升到组合机床生产线水平。

3）在模具行业中，高速切削采用的是典型的高转速、高进给、低切削量，可以取代传统的磨削加工、电火花加工以及光整加工，可以减少加工时间，缩短工艺流程，提高生产率。根据研究统计，采用高速加工可以使模具的制造周期缩短 30%～80%。

4）在精密机械或光学仪器的制造中，尺寸精度、加工稳定性等往往要求较高。采用高速加工时，激振频率很高，工作平稳，容易获得较高的尺寸精度。图 1-1 所示为汽车远光灯反光杯手板的数控高速加工。

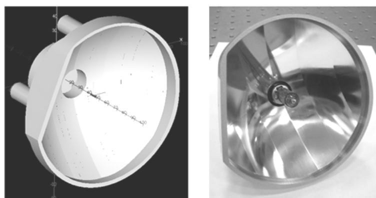


图 1-1　汽车远光灯反光杯手板的数控高速加工

1.1.2　高速加工机床的结构与分类

高速加工机床与普通加工机床存在很大的不同，它必须能够提供高切削速度。在介绍机床结构与分类之前，首先对高速加工机床特点做一归纳。

1.1.2.1　高速加工机床的特点

高速加工机床的特点主要有：

（1）高速主轴系统及驱动系统　高速主轴系统是高速切削技术最关键的技术之一。高速主轴系统不仅要提供高的转速，而且要有高的同轴度、高的传递力矩和传动功率、良好的散热或冷却装置，并具有动平衡精度。主轴部件的设计要保证具有良好的动态和热态特性，具有极高的角加、减速度，保证在极短的时间内实现升、降速和在指定位置上准停。

高速加工机床与普通机床主轴系统的不同之处表现在：主轴转速一般为普通机床主轴转速的 5～10 倍，最高转速一般都大于 10000r/min，有的高达 60000～100000r/min；主轴的加速度、减速度比普通机床高得多，一般比常规数控机床高出一个数量级，达到（1～8）g 的加速度，通常只需 1～2s 即可完成从起动到选定的最高转速（或从最高转速到停止）；主轴系统电动机功率一般高达 20～80kW，以满足高速、高效和重载荷切削的要求。

（2）高速进给系统和数控伺服驱动系统　在高速切削加工中，高速机床进给速度和其加、减速度也必须大幅度提高，同时，机床空行程运动速度也大大提高。现代高速加工机床进给系统执行机构的运动速度要求达到 40～120m/min，进给加速度和减速度同样要求达到（1～8）g。因此，机床进给驱动系统的设计必须突破一般数控机床中的“旋转伺服电动机+普通滚珠丝杠”的进给传动模式。结构上采用的主要措施有：

1）大幅度减轻进给移动部件的重量，在结构上实现零传动，即直接采用直线电动机驱动。

2）采用多线螺纹行星滚珠丝杠代替常规钢球式滚珠丝杠；采用无间隙直线滚动导轨，实现进给部件的高速移动和快速准确定位。

3）采用快速反应的伺服驱动 CNC 控制系统。

（3）高刚性的床体结构　高速加工机床在高速切削状态下，一方面产生的切削力一般作用在床体上；另一方面因速度很高，还会产生较大的附加惯性力作用在床体上，因而机床床身受力较大。设计时，要求其具有足够高的强度、刚度和阻尼特性。此外，高刚性和阻尼特性也是高速加工中保证质量和提高刀具寿命的必备条件。

（4）热态特性和静动态特性优良　高速切削加工情况下，单位时间内其移动部件间因摩擦产生的热量较多，热变性较大，机床结构设计必须保证其在内部热源和外部热源的作用下，不产生较大的热变形。因此，高速切削加工机床一般要采取特殊的冷却措施来冷却主轴电动机、主轴支撑轴承、直线电动机、液压油箱、电气柜等，有的设置冷却主轴箱、横梁、床身等大部件。由于高速切削加工下的动态力（惯性力、切削力、阻尼力）和静态力（夹紧力）较大，机床各支撑部件和其总体必须要有足够的动、静刚度，不致产生较大的变形，保证零件的加工精度、加工安全性和可靠性。

（5）换刀装置方便可靠　随着切削速度的提高、切削时间的不断缩短，对换刀时间要求也逐渐提高。缩短换刀时间对于提高加工中心的生产率就显得更加重要，也成为高水平加工中心的一项重要指标。自动换刀装置的高速化也是高速加工中心的重要技术内容。新型换刀结构的设计要保证高速切削加工下换刀方便、可靠、迅捷，换刀时间短。

（6）冷却系统高效快速　在高速切削加工条件下，单位时间内切削区域会产生大量的切削热，如果不能及时将这些热量迅速地从切削区域散出，不但妨碍切削工作的正常进行，而且会造成机床、刀具、工具系统的热变形，严重影响加工精度和动刚度。高速电主轴结构设计时，冷却系统设计也是不可忽略的一个重要方面。为了防止主轴部件在高速运转过程中出现过热现象，支撑轴承必须考虑采用有效的强制冷却方法。

（7）安全装置和实时监控系统　高速加工过程中若有刀具崩裂，飞出去的刀具碎片如同子弹出膛一般，易于造成人身伤害。因此，机床工作时必须用足够厚的钢板将切削区域封闭起来，同时还要考虑便于人工观察切削区状况。此外，工件和刀具必须保证夹紧牢靠；必须采用主动在线监控系统，对刀具磨损、破损和主轴运行状况等进行在线识别和监控，确保操作人员和设备安全。

1.1.2.2　高速加工机床结构

高速加工机床与传统机床有很大的区别，主要包括高速主轴系统、高速进给系统、高速数控系统和高速加工监测系统等，下面分别阐述。

1．高速主轴系统

高速主轴在结构上大都采用交流伺服电动机直接驱动的集成化结构，取消了齿轮变速机构；采用电气无级调速，并配备强力的冷却和润滑装置。集成电动机主轴的特

点是振动小、噪声小、体积紧凑。集成电动机主轴是把电动机转子与主轴做成一体，即将无壳电动机的空心转子用过盈配合的形式直接套装在机床主轴上；带有冷却套的定子则安装在主轴单元的壳体中，形成内装电动机主轴，简称为电主轴，如图 1−2 所示。电主轴电动机的转子就是机床的主轴，机床主轴单元的壳体就是电动机座，从而实现了变频电动机与机床主轴的一体化。这种传动方式把机床主传动链的长度缩短为零，实现了机床的零传动，有机构紧凑、易于平衡、传动效率高等特点。


图 1−2　高速加工电主轴

（1）电主轴结构　高速电主轴的结构如图 1−3 所示。电主轴交流伺服电动机的转子套装在机床主轴上，电动机定子安装在主轴单元的壳体中，采用水或油冷循环系统，使主轴在高速旋转时保持恒定的温度。电主轴的基本参数有套筒直径、最高转速、输出功率、转矩等。其中，套筒直径为电主轴的主要参数。目前，国内外专业的电主轴制造厂可供应几百种规格的电主轴，其套筒直径为 32～320mm，转速为 10000～150000r/min，功率为 0.5～80kW。

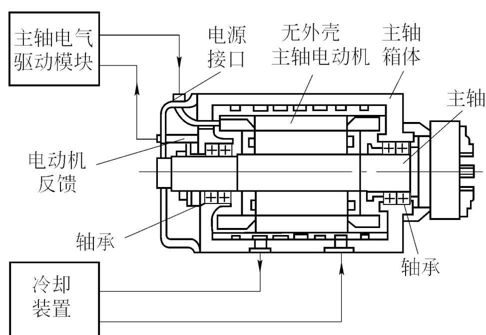


图 1−3　高速电主轴的结构

在电主轴中，电动机内置会带来不少问题，但在高速加工中，采用该措施几乎是唯一的选择，也是最佳的选择，其原因如下：

1）如果电动机不内置，仍采用电动机通过带或齿轮等方式传动，则在高速运转条件下，由此产生的振动和噪声等问题很难解决，势必影响高速加工的精度、加工表面粗糙度，并导致环境质量的恶化。

2）高速加工的最终目的是为了提高生产率，相应地要求在最短时间内实现高转速的速度变化，即要求主轴回转时具有极大的角加速度、减速度。达到这个严酷要求的最经济的方法是将主轴传动系统的转动惯量尽可能减至最小，而只有将电动机内置，省掉齿轮、带等一系列中间环节，才能达到这个目的。

3）电动机内置主轴于两支撑之间，与用带、齿轮等作为末端传动的结构相比，可以较大地提高主轴系统的刚度，也就提高了系统的固有频率，从而提高了其临界转速值。这样，电主轴即使在最高转速运转时，仍可确保低于临界转速，保证高速回转时的安全。

4）由于没有中间传动环节的外力作用，主轴高速运行没有冲击而更为平稳，使得主轴轴承寿命相应得到延长。

（2）电主轴的冷却和轴承的润滑　电主轴最突出的问题之一就是内装式高速电动机的发热问题，这与一般主轴部件不同。因为电动机安装在主轴的两支撑轴承的中央，所以电动机的发热会直接影响主轴轴承的工作精度，即影响主轴的工作精度。解决的办法之一就是在电动机定子的外面加一带螺旋槽的铝质冷却套。机床工作时，冷却油-水不断地在该螺旋槽中流动，从而把电动机放出的热量及时带走。冷却油-水的流量可根据电动机放出的热量计算确定。图 1-4 所示为电主轴的油-水热交换系统。

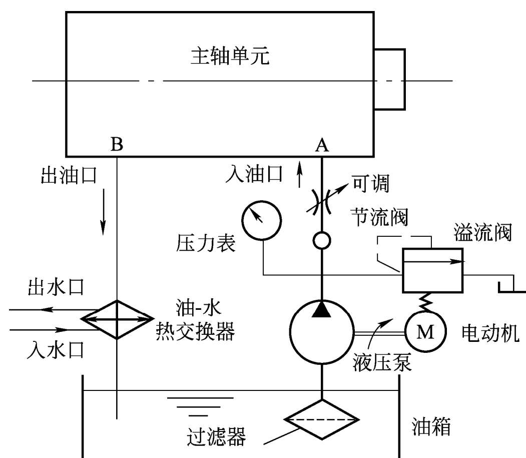


图 1-4　电主轴油-水热交换系统

另外，还必须解决主轴轴承的发热问题。由于电主轴的转速高，所以对主轴轴承的动态和热态特性要求十分严格。除个别超高速电主轴采用磁悬浮轴承或液体动静压轴承外，目前，国内外绝大多数高速电主轴都采用 Si_3N_4 陶瓷角接触球轴承。为了降低主轴轴承的温升，电主轴轴承采用了油-气润滑系统，如图 1-5 所示。它利用分配阀，对所需润滑的不同部位按照其实际需要，定时、定量地供给油-气混合物，以保证轴承的各个不同部位既不缺润滑，又不会因润滑过量而造成更大的温升，并可将油雾污染降至最低程度。

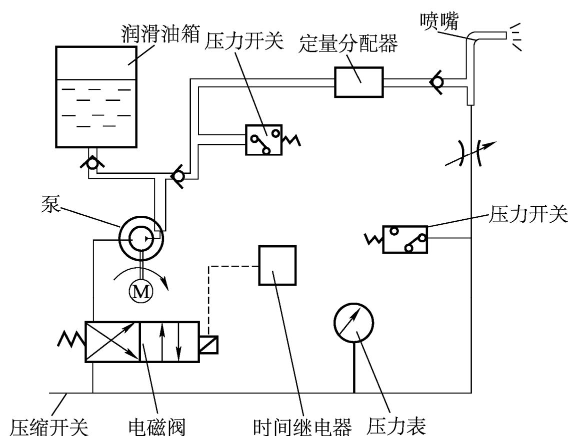


图 1-5　电主轴轴承油-气润滑系统

2. **高速进给系统**

高速进给系统是高速数控机床的关键部件之一。目前，对高速机床进给系统的要求包括以下几项：

（1）高速度　由于高速机床的主轴转速比常规机床的要高得多，并且还有继续上升的趋势，因此，为了保证高速切削的顺利进行、减少空程时间、提高数控加工效率，要求进给系统必须提供足够高的进给速度。目前，高速机床对进给速度的基本要求为 60m/min，特殊情况可达到 120m/min，甚至更高。

（2）高加速度　由于大多数高速机床加工零件的工作行程范围只有几十毫米到几百毫米，如果不能提供很大的加速度来保证在瞬间达到高速和在高速行程中瞬间准停，高速度是没有意义的，因此，对高速机床进给运动的加速度也提出了很高的要求。目前，一般高速机床要求进给加速度为（1～2）g，某些高速机床要求加速度达到（2～10）g。

（3）高精度　精度是机床的关键指标，高速机床对精度的要求尤为突出。在高速运动情况下，进给驱动系统的动态性能对机床加工精度的影响很大，在设计高速机床进给系统时必须予以充分重视。此外，随着进给系统的不断提高，各坐标轴的跟踪误差对合成轨迹精度的影响将变得越来越突出，因此在开发新型高速机床时，一方面要提高各坐标轴自身位置闭环控制的精度，另一方面也必须从合成轨迹和闭环控制的角度来研究高速情况下轨迹的控制方法与实现技术。

（4）高可靠性和高安全性　在高速加工的情况下，如果机床可靠性与安全性差，将会造成灾难性的后果，所以高速机床在这方面的要求比普通数控机床更加严格。一方面由于进给伺服系统是数控机床中强、弱之间的接口环节，其故障率一般比较高，对机床整机的可靠性造成的影响也比较大；另一方面进给系统包含有运动部件，在高速下一旦失控，将非常危险。因此，提高高速进给系统的可靠性和安全性，对提高高速机床的整机性能具有重大的意义。

（5）合理的成本　在保证质量和性能的前提下，降低高速机床的制造成本，提高其性能价格比，是推广应用这类新型机床的关键。考虑到进给系统的成本在高速机床总成本中占有比较大的比重，因此采取有效措施降低进给系统的成本，对控制整机成本具有重要意义。

1）高速滚珠丝杠副进给系统。为了使传统的滚珠丝杠传动系统应用到高速机床中，国内外有关制造厂商不断采取措施，提高滚珠丝杠的高速性能。主要措施有：

① 适当加大丝杠的转速、导程和螺纹线数。目前，常用大导程滚珠丝杠名义直径与导程的匹配为 40mm×20mm、50mm×25mm、50mm×30mm 等，其进给速度均可达到 60m/min 以上。为了提高滚珠丝杠的刚度和承载能力，大导程滚珠丝杠一般采用双线螺纹，以提高滚珠的有效承载圈数。

② 改进结构，提高滚珠运动的流畅性。改进滚珠循环反向装置，优化回珠槽的曲线参数，采用三维造型的导珠管和回珠器，真正做到沿着内螺纹的导程角方向将滚珠引进螺母体中，使滚珠运动的方向与滚道相切而不是相交。这样可把冲击损耗和噪声减至最小。

③ 采用“空心强冷”技术。高速滚珠丝杠在运行时，由于摩擦产生高温，造成丝杠的热变形，直接影响高速机床的加工精度。采用“空心强冷”技术，就是将恒温切削液通入空心丝杠的孔中，对滚珠丝杠进行强制冷却，保持滚珠副温度的恒定。这个措施是提高中、大型滚珠丝杠高速性能和工作精度的有效途径。

④ 对于大行程的高速进给系统，可采用丝杠固定、螺母旋转的传动方式。此时，螺母一边转动、一边沿固定的丝杠作轴向移动，由于丝杠不动，可避免受临界转速的限制，避免了细长滚珠丝杠高速运转时出现的种种问题。螺母惯性小、运动灵活，可实现的转速高。

⑤ 进一步提高滚珠丝杠的制造质量。通过采用上述种种措施后，可在一定程度上克服传统滚珠丝杠存在的一些问题。日本和瑞士在滚珠丝杠高速化方面一直处于国际领先地位，其最大快速移动速度可达 60m/min，个别情况下甚至可达 90m/min，加速度可达 $15m/s^2$。由于滚珠丝杠历史悠久、工艺成熟、应用广泛、成本较低，因此在中等载荷、进给速度要求并不十分高、行程范围不太大（4～5m）的一般高速加工中心和其他经济型高速数控机床上仍然经常被采用。

2）直线电动机进给驱动系统。1971 年后，直线电动机开始进入独立应用的时期，并得到了迅速的推广，制成了许多有实用价值的装置和产品，例如直线电动机驱动的钢管输送机、运煤机、各种电动门、电动窗等。利用直线电动机驱动的磁悬浮列车，速度已超过 500km/h，接近了航空飞行的速度。图 1-6 所示为直线电动机的模型。



图 1-6　直线电动机模型

直线电动机是一种将电能直接转换成直线运动机械能，而不需要任何中间转换机构的传动装置。它可以看成是一台旋转电动机按径向剖开，并展成平面而成，如图 1-7 所示。由定子演变而来的一侧称为初级，由转子演变而来的一侧称为次级。在实际应用时，将初级和次级制造成不同的长度，以保证在所需行程范围内初级与次级之间的耦合保持不变。直线电动机可以是短初级长次级，也可以是长初级短次级。考虑到制造成本、运行费用，目前一般均采用短初级长次级。

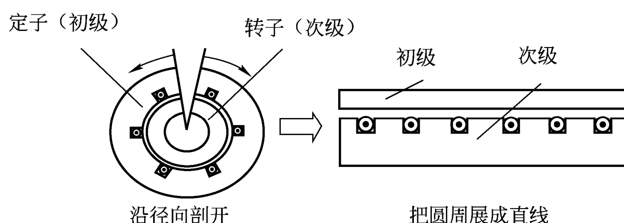


图 1-7　旋转电动机展开为直线电动机的过程

直线电动机的工作原理与旋转电动机相似。以直线感应电动机为例：当初级绕组通入交流电源时，便在气隙中产生行波磁场；次级绕组在行波磁场切割下，将感应出电动势并产生电流，该电流与气隙中的磁场相作用就产生电磁推力。如果初级固定，则次级在推力作用下作直线运动；反之，则初级作直线运动。

采用直线电动机驱动系统代替滚珠丝杠，可简化系统结构、提高定位精度、实现高速直线运动乃至平面运动。它具有以下特点：

① 精度高。由于取消了丝杠等机械传动机构，实现了零传动，可减少插补时因传动系统滞后带来的跟踪误差。利用光栅作为工作台的位置测量反馈元件进行闭环控制,通过反馈对工作台的位移进行精确控制,定位误差可达到0.1～0.01μm。

② 速度快、加减速过程短。直线电动机直接驱动进给部件，取消了中间机械传动件，无旋转运动和离心力作用，可容易地实现高速直线运动。目前，由于采用直线电动机直接驱动进给部件，实现零传动的高速响应性，而使其加减速过程大大缩短，从而实现起动瞬间达到高速，高速运行时又能瞬间准停，其加速度可达到（2～10）g，最大进给速度可达到 80～180m/min。

③ 传动刚度高、推力平稳。由于采用直线电动机直接驱动进给部件，机床进给传动链的长度缩短为零，实现了机床的零传动，大大提高了其传动刚度；同时，直线电动机的布局可根据机床导轨的型面结构及其工作台运动时的受力情况来布置。

④ 高速响应性。由于机床进给传动链的长度缩短为零，在系统中取消了一些响应时间常数较大的机械传动件，使整个闭环控制系统动态响应性能大大提高。

⑤ 运行效率高、噪声低。由于无中间传动环节，消除了传动丝杠等部件的机械摩擦所导致的能量损耗，导轨副采用滚动导轨或磁垫悬浮导轨，使运动噪声大大下降。

⑥ 行程长度不受限制。在导轨上通过串联直线电动机的定件，可无限延长运动的行程长度。行程长度对整个系统的刚度不会有太大的影响。

3）并联结构的高速进给系统。现有高速机床的总体结构基本上采用工件和刀具共同运动的方案。在这类工件和工作台一体运动的常规结构中，由于工件、夹具和工作台的总质量比较大，不但增加了机床导轨中的摩擦阻力，需耗费较大的驱动功率，而且更为严重的是，要驱动大的质量体完成高加速度运动，将需要很大的推动力，这将显著提高直线伺服电动机的功率，既提高了机床成本又增加了发热，对机床加工精度造成不利影响。此外，传统高速机床结构是一种串联开链结构，组成环节多（特别是在多坐标机床中），结构复杂，并且由于存在悬臂部件和环节间的连接间隙，不容易获得高的总体刚度，难以适应超高速加工进一步发展的要求。

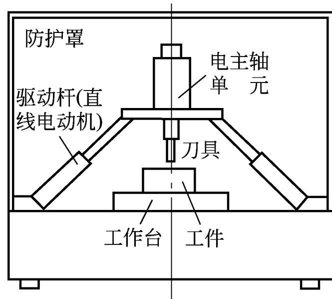


图 1-8 并联机床进给系统结构示意图

采用基于 Stewart 平台原理的并联闭链多自由度驱动结构，构成了工件固定、刀具（主轴）运动的适合超高速加工中心的新方案，如图 1-8 所示。该机床的电主轴单元由 6 根可变长度驱动杆支撑，6 根驱动杆的另一端固定于基础框架上。各驱动杆与主

轴单元和基础框架的连接均采用可预紧的高刚度滚动结构，这样可使驱动杆不承受弯曲力矩且运动灵活。调节 6 根驱动杆的长度，可使主轴和刀具作六自由度运动，其中包括沿 3 个线性轴 X、Y、Z 的平移运动和沿 3 个转动轴 A、B、C 的旋转运动。由于驱动杆在切削力和温度变化作用下的受力变形和热变形主要影响杆的长度，因此通过对杆长进行闭环控制并对测量装置的误差进行实时补偿，可以有效校正杆长位移误差，使机床获得高的加工精度。在这一新型结构中，虽然需用 6 套进给伺服系统，但每一伺服系统的功率都比常规数控机床单个坐标的驱动功率小，因此总的进给驱动功率与常规机床相当，不会明显增加进给驱动部分的成本。

从总体上看，采用上述结构的超高速加工中心具有以下特点：

① 机械结构简单，零部件通用化、标准化程度高，易于经济化批量生产。此外，该机床整体质量轻，约为常规机床的 1/5～1/3，因此，原材料消耗少、加工量少，将进一步降低制造成本。

② 工件固定而主轴相对于工件作多自由度运动，因此将主轴部件做成电主轴单元，可以有较小的质量，非常有利于获得高的加速度。

③ 进给机构为空间并联机构，在驱动电动机速度相同的条件下，与采用串联结构的常规数控机床相比可以获得更高的进给速度，有利于满足超高速加工对进给速度的要求。

④ 六杆平台结构将传动与支撑功能集成为一体，6 根驱动杆既是机床的传动部件又兼做主轴单元的支撑部件，这不仅大幅度减小了摩擦阻力，有利于进一步提高进给速度与加速度，而且将有效减少工件—机床—刀具链中的环节，消除了这些环节带来的力变形和热变形，并可减少连接和传动间隙，提高接触刚度，有利于提高机床的综合精度。

⑤ 因机床的主体为并联闭链结构，消除了常规机床中的悬臂环节，经过合理设计，可使各驱动杆和有关部件只承受拉压力而不受弯曲力矩，因而使机床总体刚度进一步提高（可比一般加工中心高 5 倍左右）。如果在传动与控制上处理得当，可以使由此构成的新型机床达到比常规机床高得多的加工质量。

⑥ 机床上不存在沿固定导轨运动的直线和旋转工作台，以及支承工作台所需的其他部件，因此，刀具在空间的定位精度和运动轨迹精度，完全由传动、检测和控制来保证，从而彻底消除了导轨、工作台、立柱、横梁等引起的空间几何误差。

⑦ 利用该加工中心的主轴部件可作六自由度高速运动，让主轴直接参与换刀过程，不仅可使刀库配置位置灵活，而且可减少刀库运动的自由度，显著简化刀库和换刀装置的结构。更重要的是，换刀环节的减少和机械结构上的简化，将有效提高换刀的可靠性，这在自动化加工系统中是非常重要的。

3．高速数控系统

高速加工机床的数控系统从基本原理上与普通数控机床的数控系统没有本质区别，只是由于主轴转速、进给速度和加速度非常高，而且在进给方向上采用直线电动机驱动，对数控系统提出了更高的要求。

（1）高速机床 CNC 数控系统应满足的基本要求

1）为了适应高速，要求单个程序段处理时间短。

2）为了在高速下保证加工精度，要有前馈和大量的超前程序段处理功能。

3）要求快速形成刀具路径，此路径应尽可能圆滑，走样条曲线而不是驻点跟踪，少折点、无尖转点。

4）程序算法应保证高精度。

5）遇到干扰能迅速调整，保持合理的进给速度，避免刀具振动等。

（2）高速机床的 CNC 数控系统应具有的特点

1）采用 32 位 CPU、多 CPU 处理器以及 64 位 RISC 芯片结构，以保证高速处理程序段。因为在高速下要生成光滑、精确的复杂轮廓时，会使一个程序段的运动距离只等于 1mm 的几分之一，其结果使 NC 程序将包括几千个程序段。这样的处理负荷不但超过大多数 16 位控制系统，甚至超过 32 位控制系统的处理能力。超载的原因之一是控制系统必须高速阅读程序段，以达到高的切削速度和进给速度的要求；其二是控制系统必须预先做出加速或减速的决定，以防止滞后现象发生。

2）能迅速、准确地处理和控制信息流，把其加工误差控制在很小，同时保证控制执行机构运动平滑，机械冲击小。

3）CNC 要有足够的容量和很大的缓冲内存，以保证大容量的加工程序高速运行；同时，还要求系统具有网络传输功能，便于实现复杂曲面 CAD/CAM/CAE 的一体化。

总之，高速切削机床必须具有一个高性能数控系统，以保证高速下的快速响应能力和零件加工的高精度。

4．高速加工监测系统

高速加工监测系统的主要任务是在高速加工中，通过传感、分析、信号处理等，对高速机床及系统的状态进行实时在线的监测和控制，包括位置监测、刀具状态监测、工件状态监测以及机床工况监测等。

（1）位置监测　为了实现高精度加工，必须具有位置反馈系统。位置反馈系统用来监测和控制刀架或工作台等按数控装置的指令值移动的移动量。它是高速加工机床闭环伺服系统的重要组成部分。高速加工机床的常用测量器件有感应同步器、光栅、磁尺等。

位置监测是数控系统的关键之一，不同类型的数控机床对测量器件和测量系统的精度和速度要求也不同。一般数控机床要求测量器件的分辨力为 0.001～0.01mm，

要求数控机床快速移动速度为 1～10m/min，并且抗干扰能力强，能适应机床的工作环境。在高速加工中，主轴最高转速高达 10^4～10^5r/min，最大进给速度为 10～100m/min，同时要求精度为 0.1～1μm。因此，提高传感器的响应速度和精度，发展适合高速度、高精度的位移和转速传感器，提高处理速度，发展高速数字跟踪位置测量系统是必然的趋势。

（2）刀具监测　在高速加工中，高速旋转的刀具承受很大的离心力，并且刀具的磨损直接影响到加工质量，因此，需要对刀具进行实时的监测和控制。目前，监控方法主要采用直接监控法和间接监控法。直接监控法，包括光学图像法和接触电阻法是通过一定的测量手段，来确定刀具材料在体积上或质量上的减少，并通过一定的数学模型来确定刀具的磨损或破损状态。间接监控法，包括切削力监控法、振动监控法和声发射监控法等，是测量切削过程中与刀具磨损或破损有很大内在联系的某一种或几种参数，或测量某种物理现象，根据其变化并通过一定的标定关系来监控刀具的磨损或破损状态。

声发射监控法的主要缺点是不同的工艺系统互换性差，而且声发射传感器的定位安装也存在一定的困难。安装在刀具或工件上，虽然对信号采集有利，但实际应用存在一定困难；如果安装在主轴上或冷却喷管中，信号则会有一定程度的减弱；振动传感器的监控位置选择也困难，其理想的安装位置是加工工件的垂直表面，但在实际加工中却同样难以实现。因此，基于高速加工的复杂性，如果仅使用单一的传感器对加工过程刀具状态进行预报，往往会出现误测、误报，所以在实际加工中需要多传感器融合技术来提高监测、预报的准确性。

（3）工件状态监测　在实际加工中，由于影响加工的因素较多，需要对加工中的工件进行实时的监测。工件状态监测主要是指在线监测，即在加工过程中对工件的尺寸、形状、表面粗糙度等进行测定，并把测定的数据反馈到机床的进刀系统，以控制工具的准确位置，通常采用非接触式传感器来实现。

1.1.2.3　高速加工机床分类

高速加工机床按照结构类型可分为卧式高速加工中心、立式高速加工中心和龙门高速加工中心。

1．卧式高速加工中心

如图 1-9 所示，卧式高速加工中心与普通的卧式加工机床相似，其主轴是水平设置的。一般的卧式高速加工中心有 3～5 个坐标轴，常配有一个回转轴（或回转工件台）；主轴转速为 10～10000r/min；最小分辨率为 1μm；定位精度为 10～20μm。卧式高速加工中心刀库容量一般较大，有的刀库可存放几百把刀具。卧式高速加工中心的结



图 1-9　卧式高速加工中心

构较立式高速加工中心复杂，体积和占地面积较大，价格也较高，较适于加工箱体类零件。只要一次装夹在回转工作台上，即可对箱体（除顶面和底面之外）的四个面进行铣、镗、钻、攻螺纹等加工。

卧式高速加工中心程序调试时，不如立式高速加工中心直观而容易观察，对工件检查和测量也不方便，且对复杂零件的加工程序调试时间是正常加工的几倍，所以加工的工件数量越多，平均每件占用机床的时间越少。因此，用卧式高速加工中心进行批量加工才合算。但它可实现普通设备难以达到的精度和质量要求，因此一些精度要求高、其他设备无法达到其精度要求的工件，特别是一些空间曲面和形状复杂的工件，即使是单件生产，也可考虑在卧式高速加工中心上加工。由此可见，卧式高速加工中心既是高效、高质量的自动化生产设备，又是攻克工艺难题的设备。

2. 立式高速加工中心

立式高速加工中心采用普通立式加工的形式，刀具主轴垂直设置，能完成铣削、镗削、钻削、攻螺纹等多工序加工，适宜加工高度尺寸较小的零件。但立式高速加工中心在普通立式加工中心的基础上作了两个方面的改进，一方面由电主轴单元代替了原来的主轴系统；另一方面改变了机床的进给运动分配方案，由工作台运动变成刀具主轴（立柱）作进给运动，工作台固定不动。为了减轻运动部件的质量，刀库和换刀装置不宜再装在立柱的侧面，而把它固定安装在工作台的一侧，由立柱快速移动到换刀位置进行换刀。图 1-10 所示为德国哈默 HERMLE 立式高速加工中心。表 1-2 所列为它的技术参数。

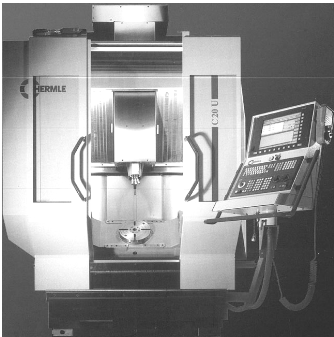


图 1-10 德国哈默 HERMLE 立式高速加工中心

表 1-2 德国哈默 HERMLE 立式高速加工中心的技术参数

技 术 参 数	参 数
X 轴行程/mm	600
Y 轴行程/mm	450
Z 轴行程/mm	450
主轴转速/（r/min）	10000/16000/40000
X、Y、Z 快速移动速度/（m/min）	45
控制系统	iTNC530/S840D
夹紧工作台尺寸/mm	800×465
工作台最大承载质量/kg	1000
内置数控回转摆动工作台（在夹紧工作台内）摆角/（°）	±115

3. 龙门高速加工中心

龙门高速加工中心立轴多为垂直设置，除带有自动换刀装置外，还带有可更换的主轴头附件，数控装置功能齐全。为了实现龙门高速加工中心的高速化，需将机床结构和运动分配进行一些调整。普通龙门式机床采用工作台进给，但由于工作台质量大，加之加工的往往又是重型零件，要想实现工作台高速、高加速度运动比较困难。因此，在高速加工机床中采用双墙式结构支撑横梁，横梁在墙式支撑上可进行快速进给运动，调整工作台进给为横梁进给运动。

图 1-11 所示为意大利 POSEIDON 系列五轴联动桥式龙门高速加工中心。它采用高刚性桥式结构、龙门电气双驱、齿轮齿条结构、高动态特性、模块化设计，具有高功率、高转速。该设计确保了机床的高精度、高动态特性、高刚性和高稳定性，适合任何非金属材料和轻铝合金材料的中、大型工件的五轴联动加工。表 1-3 所列为 POSEIDON 系列五轴联动桥式龙门高速加工中心的技术参数。

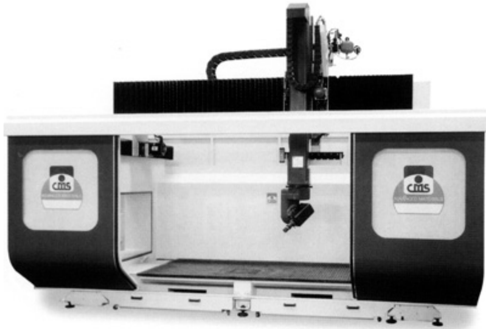


图 1-11　意大利 POSEIDON 系列五轴联动桥式龙门高速加工中心

表 1-3　意大利 POSEIDON 系列五轴联动桥式龙门高速加工中心的技术参数

技 术 参 数	参　　数
X 轴行程/mm	3800/5300/6800/8300/9800/11700
Y 轴行程/mm	3100/3300
Z 轴行程/mm	1200/1500/1800
龙门立柱跨距/mm	4470
主轴端部至工作台距离/mm	最低点：0～500，最高点：1500～2050
最大进给速度/（m/min）	30
最大加速度/（m/s^2）	3
最大转速/（r/min）	10000，8000
最大输出功率/kW	26，32
最大输出转矩/N·m	500，611
断面尺寸/mm	590×590

1.1.3 高速加工刀具的材料和结构

高速加工时，产生的切削热和对刀具的磨损比普通速度切削时要高得多，因此要求高速刀具切削部分的材料要能承受高温、高压、强烈的摩擦、冲击和振动。具体要求有：

1）高硬度。刀具材料的硬度必须高于工件材料的硬度。刀具材料的常温硬度一般要求在 60HRC 以上。

2）高耐磨性。一般刀具材料的硬度越高，耐磨性越好。

3）足够的强度和韧性。可以承受切削力、冲击和振动，而不至于产生崩刃和折断。

4）高耐热性（热稳定性）。耐热性是指刀具材料在高温下保持硬度、耐磨性、强度和韧性的能力。

5）良好的热物理性能和耐热冲击性能。刀具材料的导热性能要好，不会因受到大的热冲击产生刀具内部裂纹而导致刀具断裂。

6）良好的工艺性能。刀具材料应具有良好的可锻性、热处理性能、焊接性、磨削可加工性等。

下面对高速加工的刀具材料做一详细介绍。

1.1.3.1 高速加工刀具的材料及其选择

目前，国内外用于高速加工的刀具材料包括硬质合金涂层刀具、陶瓷刀具、聚晶金刚石（PCD）和立方氮化硼。

1．常用高速加工刀具材料

（1）硬质合金涂层刀具　硬质合金刀具的使用开始于 20 世纪 40 年代。20 世纪 70 年代以前都是使用无涂层的硬质合金，而现在使用的硬质合金刀具有三分之二以上是经过涂层处理的。

硬质合金是用高耐热性和高耐磨性的金属碳化物（碳化钨、碳化铁、碳化钽、碳化铌等）与金属粘结剂（钴、镍、钼等）在高温下烧结而成的粉末冶金制品。硬质合金刀具材料的问世，使切削加工水平出现了一个飞跃，但由于刀具的耐热性和耐磨性差，适应不了高速切削。刀具磨损机理研究表明，在高速切削时，刀尖温度将超过 900°C，此时刀具的磨损不仅是机械磨损（后面磨损），还有粘接磨损、扩散磨损以及氧化磨损（切削刃磨损和月牙洼磨损的主要形式）。因此，高速切削下的刀具材料需要更高的硬度和耐热性、耐磨性。采用刀具涂层技术，在硬质合金刀片上加上一层或多层高性能的材料，就可以使硬质合金刀具不仅能够发挥本身的优势，而且可以进行高速切削。刀具涂层技术使硬质合金焕发了青春，涂层硬质合金刀具在高速切削钢和铸铁时能获得良好的效果。

1）刀具涂层技术。刀具涂层技术目前主要采用两种方法：CVD（化学气相沉积）和 PVD（物理气相沉积）。

CVD 是在相当高的温度下，混合气体与工件表面相互作用，使混合气体中的某些成分分解，并在工件表面形成一种金属或化合物固态薄膜或镀层。CVD 的反应温度取决于沉积物的特性，通常为 900～2000℃。

PVD 是 Physical Vapor Deposition（物理气相沉积）的缩写，是指在真空条件下，采用低电压、大电流的电弧放电技术，利用气体放电使靶材蒸发，并使被蒸发物质与气体都发生电离，利用电场的加速作用，使被蒸发物质及其反应产物沉积在工件上。物理气相沉积方法有真空镀、真空溅射和离子镀三种，目前应用较广的是离子镀。离子镀是借助于惰性气体辉光放电，使镀料（如金属钛）汽化蒸发离子化，离子经电场加速，以较高能量轰击工件表面，此时如通入 CO_2、N_2 等反应气体，便可在工件表面获得 TiC、TiN 覆盖层，硬度高达 2000HV。离子镀的重要特点是沉积温度只有 500℃左右，且覆盖层附着力强，适用于高速钢工具、热锻模等。

与 CVD 工艺相比，PVD 工艺处理温度低，在 600℃以下时对刀具材料的抗弯强度无影响；薄膜内部应力状态为压应力，更适于对硬质合金精密复杂刀具的涂层；PVD 工艺对环境无不利影响，符合现代绿色制造的发展方向。目前，PVD 涂层技术已普遍应用于硬质合金立铣刀、钻头、阶梯钻、油孔钻、铰刀、丝锥、可转位铣刀片、异形刀具、焊接刀具等的涂层处理。

2）涂层刀具的特点。涂层刀具结合了基体高强度、高韧性和涂层高硬度、高耐磨性的优点，提高了刀具的耐磨性而不降低其韧性。涂层刀具通用性广，加工范围显著扩大，使用时可以获得明显的经济效益。一种涂层刀具可以替代数种非涂层刀具使用，因此可以大大减少刀具的品种和库存量，简化刀具管理、降低刀具和设备成本。但是刀具以现有的涂层工艺进行涂层后，因基体材料和涂层材料性质差别较大，涂层残留内应力大，涂层和基体之间的界面结合强度低，涂层容易剥落，而且涂层过程中还造成基体强度下降、涂层刀片重磨性差、涂层设备复杂、工艺要求高、涂层时间长、刀具成本上升等缺点。

（2）TiC（TiN）基硬质合金　TiC（TiN）基硬质合金是以 TiC 为主要成分的合金，其性能介于陶瓷和硬质合金之间。由于 TiC（TiN）基硬质合金有接近于陶瓷的硬度和耐热性，加工时与钢的摩擦系数小，且抗弯强度和断裂韧度比陶瓷高。因此，TiC（TiN）基硬质合金可作为高速切削加工刀具材料，用于精车时，切削速度比硬质合金提高 20%～50%。

TiC（TiN）基硬质合金既具有陶瓷的高硬度，又具有硬质合金的高强度，用于可转位刀片，还能焊接。TiC（TiN）基硬质合金不仅可用于精加工，而且也扩大到半精加工、粗加工和断续切削。

（3）陶瓷刀具　陶瓷具有很高的硬度、耐磨性及良好的高温性能，与金属亲和

力小，并且化学稳定性好。因此，陶瓷刀具可以加工传统刀具难以加工的高硬材料，实现以切代磨，从而避免退火，简化工艺，大幅度地节省了工时和电力。陶瓷刀具的最佳切削速度可比硬质合金刀具高 3～10 倍，而且寿命长，可以大大提高切削效率。用于高速加工的陶瓷刀具包括氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷等。氧化铝陶瓷刀具是以氧化铝为主要成分，热压或冷压成形并在高温下烧结而成的一种刀具材料。陶瓷刀具的主要缺点是强度和韧性差，热导率低。由于陶瓷刀具脆性大、抗弯强度和韧性低，因此承受冲击的能力差；其热导率仅为硬质合金的 1/3～1/2，但线膨胀系数却比硬质合金高出 10%～30%，因而抗热冲击性能也差。当温度突变时，容易生成裂纹，导致刀具破损。用陶瓷刀具切削时，不要使用切削液。

陶瓷刀具具有硬度高、价格低的优点，在改进烧结制造工艺和采取增韧措施后，陶瓷刀具的强度和韧性大幅度提高，适于对高硬度淬硬钢进行干切削。研究表明，大多数的硬质合金刀具，包括涂层刀具都不适合切削硬度大于 58HRC 的淬硬钢。陶瓷刀具和立方氮化硼刀具都具有很高的显微硬度和热稳定性，是干切削淬硬钢比较理想的刀具，但立方氮化硼刀具价格昂贵，且抗弯强度和断裂韧度比较低，而陶瓷刀具资源丰富，价格不到立方氮化硼刀具的一半，因此采用陶瓷刀具更合适。随着陶瓷强化技术的进一步发展，在高速精加工、半精加工、干切削和硬切削中，陶瓷刀具将会发挥更大的作用。

（4）立方氮化硼刀具　立方氮化硼（Cubic Boron Nitride，CBN）是用立方氮化硼为原料，利用超高温高压技术制成的一种无机超硬材料。聚晶立方氮化硼（PCBN）是在高温高压下将微细的 CBN 材料通过结合相烧结在一起的多晶材料，晶粒中的 *w*（CBN）为 50%～60%时，具有很高的抗压强度和化学稳定性，主要用于硬切削。由于受 CBN 制造技术的限制，目前制造直接用于切削的大颗粒 CBN 刀具仍有困难，因此 PCBN 发展较快，PCBN 的性能主要受其中的 CBN 含量、CBN 粒径和结合剂的影响。

立方氮化硼刀具具有很多优点，包括很高的硬度和耐磨性、较高的热稳定性、优良的化学稳定性、良好的热导性、较低的摩擦系数。虽然 CBN 刀具有很多优点，但也有缺点，如脆性大、强度及韧性较差，抗弯强度大约只有陶瓷刀具的 1/5～1/2，故一般只用于精加工。

目前，立方氮化硼刀具最适合高硬度淬火钢、高温合金、可切削轴承钢（60～62HRC）、工具钢（57～60HRC）、高速钢（63HRC）等材料的高速加工。在淬硬模具钢的加工中，用 CBN 刀具进行高速切削，可以起到以铣代磨的作用，大大减少了手工修光工作量，从而可大幅度提高加工效率。低含量 CBN [*w*（CBN）=45%～65%] 主要用于精加工 45～61HRC 的淬硬钢；高含量 CBN [*w*（CBN）=80%～90%] 主要用于粗、半粗加工镍、铬铸铁，断续切削淬硬钢，高速切削铸铁、硬金属、烧结金属与重合金等。

（5）金刚石刀具　金刚石分为天然金刚石和人造金刚石。天然金刚石具有自然界物质中最高的硬度和热导率，但由于价格昂贵，加工、焊接都非常困难，除少数特殊用途外（如手表精密零件、光饰件和首饰雕刻等的加工），很少作为切削工具应用在工业中。随着高技术和超精密加工的日益发展，例如微型机械的微型零件、原子核反应堆及其他高技术领域的各种反射镜、导弹或火箭中的导航陀螺、计算机硬盘芯片、加速器电子枪等超精密零件的加工，单晶天然金刚石能满足上述要求。近年来开发了多种化学机理研磨金刚石刀具的方法和保护气体钎焊金刚石技术，使天然金刚石刀具的制造过程变得比较简易。因此，在超精密镜面切削的高技术应用领域，天然金刚石刀具起到了重要作用。

20 世纪 50 年代利用高温高压技术人工合成金刚石粉以后，20 世纪 70 年代制造出金刚石基的切削刀具，即聚晶金刚石（PCD）。PCD 晶粒呈无序排列状态，不具方向性，因而硬度均匀。它有很高的硬度和导热性、低的线膨胀系数、高的弹性模量和较低的摩擦系数，切削刃非常锋利；可加工各种有色金属和极耐磨的高性能非金属材料，如铝、铜、镁及其合金、硬质合金、纤维增强塑料、金属基复合材料、木材复合材料等。

金刚石刀具具有以下特点：极高的硬度和耐磨性、很低的摩擦系数、切削刃非常锋利、较低的线膨胀系数，PCD 刀具与有色金属和非金属材料间的亲和力很小。因此，金刚石刀具是目前高速切削（2500～5000m/min）铝合金较理想的刀具材料，但由于碳对铁的亲和作用，特别是在高温下，金刚石能与铁发生化学反应，因此不宜于切削铁及其合金工件。

2. 高速加工刀具材料的选择

目前广泛应用的高速加工刀具材料主要有金刚石、立方氮化硼、陶瓷、涂层硬质合金等，而且每一类刀具都有其特定的加工范围，只能适应一定的工件材料和一定的切削速度范围。因此，高速加工刀具材料必须根据所加工的工件和加工性质来选择。

一般而言，PCBN 刀具、陶瓷刀具、涂层硬质合金及 TiC 基硬质合金刀具适合于钢铁等黑色金属的高速加工；而 PCD 刀具适合于对铝、镁、铜等有色金属及其合金和非金属的高速加工。各种刀具材料所适合加工的工件材料如表 1-4 所示。

表 1-4　各种刀具材料所适合加工的工件材料

刀具材料 \ 工件材料	高硬钢	耐热合金	钛合金	镍基高温合金	铸铁
PCD	×	×	●	×	×
PCBN	●	●	▲	●	▲
陶瓷	●	●	×	●	●
涂层硬质合金	▲	●	●	▲	●

注：●—优　▲—良　×—不适合

（1）铝合金

1）易切削铝合金：该材料在航空航天工业中应用较多，适用的刀具有 K10、K20、PCD，切削速度在 2000～4000m/min，进给速度在 3～12m/min，刀具前角为 12°～18°、后角为 10°～18°、刃倾角可达 25°。

2）铸铝合金：铸铝合金根据其 Si 含量的不同，选用的刀具也不同。对 *w*（Si）<12%的铸铝合金，可采用 K10、Si_3N_4 刀具；当 *w*（Si）>12%时，可采用 PKD（人造金刚石）、PCD 及 CVD 金刚石涂层刀具；对于 *w*（Si）=16%～18%的过硅铝合金，最好采用 PCD 或 CVD 金刚石涂层刀具，其切削速度可在 1100m/min，进给量为 0.125mm/r。

（2）铸铁　对铸件，切削速度大于 350m/min 时，称为高速加工，切削速度对刀具的选用有较大影响；当切削速度低于 750m/min 时，可选用涂层硬质合金、金属陶瓷；切削速度在 510～2000m/min 时，可选用 Si_3N_4 陶瓷刀具；切削速度在 2000～4500m/min 时，可使用 CBN 刀具。铸件的金相组织对高速加工刀具的选用有一定影响，加工以珠光体为主的铸件，在切削速度大于 500m/min 时，可使用 CBN 或 Si_3N_4；当以铁素体为主时，由于扩散磨损的原因，使刀具磨损严重，不宜使用 CBN，而应采用陶瓷刀具。粘结相为金属 Co、晶粒尺寸平均为 3μm、*w*（CBN）为 90%～95%的 BZN6000，在切削速度等于 700m/min 时，宜加工高铁素体含量的灰铸铁。粘结相为陶瓷（$AlN+AlB_2$）、晶粒尺寸平均为 10μm、*w*（CBN）为 90%～95%的 Amborite 刀片，在加工高珠光体含量的灰铸铁时，在切削速度小于 1100m/min 时，随切削速度的增加，刀具寿命也增加。

（3）普通钢　切削速度对钢的表面质量有较大的影响，根据德国 Darmstadt 大学 PTW 研究所的研究，其最佳切削速度为 500～800m/min。目前，涂层硬质合金、金属陶瓷、非金属陶瓷、CBN 刀具均可作为高速切削钢件的刀具材料。其中，涂层硬质合金可用切削液。用 PVD 涂层方法生产的 TiN 涂层刀具，其耐磨性能比用 CVD 涂层法生产的涂层刀具要好，因为前者可很好地保持切削刃形状，使加工零件获得较高的精度和表面质量。金属陶瓷刀具占日本刀具市场的 30%，以 TiC-Ni-Mo 为基体的金属陶瓷化学稳定性好，但抗弯强度及导热性差，适于切削速度在 400～800m/min 的小进给量、小切削深度的精加工；Carboly 公司用 TiCN 作为基体、结合剂中少钼多钨的金属陶瓷将强度和耐磨两者结合起来；Kyocera 公司用 TiN 来增加金属陶瓷的韧性，其加工钢或铸铁的切削深度可达 2～3mm。CBN 可用于铣削含有微量或不含铁素体组织的轴承钢或淬硬钢。

（4）高硬度钢　高硬度钢（40～70HRC）的高速加工刀具材料可用金属陶瓷、陶瓷、TiC 涂层硬质合金、PCBN 等。金属陶瓷可用基本成分为 TiC 添加 TiN 的金属陶瓷，其硬度和断裂韧度与硬质合金大致相当，而热导率不到硬质合金的 1/10，并具有优异的耐氧化性、抗粘结性和耐磨性；另外，在高温下力学性能好，与钢的

亲和力小，适合于中高速（在 200m/min 左右）的模具钢 SKD 加工。金属陶瓷尤其适合于切槽加工。采用陶瓷刀具可切削硬度达 63HRC 的工件材料，进行工件淬火后再切削，可实现“以切代磨”。切削淬火硬度达 48～58HRC 的 45 钢时，切削速度可取 150～180m/min，进给量在 0.3～0.4r/min，切削深度可取 2～4mm。粒度在 1μm、*w*（TiC）在 20%～30%的 Al_2O_3-TiC 陶瓷刀具，在切削速度为 100m/min 左右时，可用于加工具有较高抗剥落性能的高硬度钢。

当切削速度高于 1000m/min 时，PCBN 是最佳刀具材料。*w*（CBN）>90%的 PCBN 刀具适合加工淬硬工具钢（如 55HRC 的 H13 工具钢）。

（5）高温镍基合金　Inconel 718 镍基合金是典型的难加工材料，具有较高的高温强度、动态剪切强度，热扩散系数较小，切削时易产生加工硬化，这将导致刀具切削区温度高、磨损速度加快。高速切削该合金时，主要使用陶瓷和 CBN 刀具。

Al_2O_3-SiC 陶瓷切削速度在 100～300m/min 时，可获得较长的刀具寿命。切削速度高于 500m/min 时，添加 Al_2O_3-TiC 的陶瓷刀具磨损较小，而在 100～300m/min 时其缺口磨损较大。氮化硅陶瓷（Si_3N_4）也可用于 Inconel 718 合金的加工。

加拿大学者 M A Elbestawi 认为，Al_2O_3-SiC 陶瓷加工 Inconel 718 的最佳切削条件：切削速度为 700m/min，切削深度为 1～2mm，进给量为 0.1～0.18mm/z。

氮氧化硅铝（Sialon）陶瓷韧性很高，适合于切削过固溶处理的 Inconel 718（45HRC）合金，Al_2O_3-SiC 陶瓷适合于加工硬度低的镍基合金。

（6）钛合金（Ti6Al6V2Sn）　钛合金强度、冲击韧度大，硬度稍低于 Inconel 718 合金，但其加工硬化非常严重，故在切削加工时出现温度高、刀具磨损严重的现象。日本学者经过大量实验得出，用直径 10mm 的硬质合金 K10 两刃螺旋铣刀（螺旋角为 30°）高速铣削钛合金，可达到满意的刀具寿命，切削速度可达 628m/min，每齿进给量可取 0.06～0.12mm/z，连续高速车削钛合金的切削速度不宜超过 200m/min。

（7）复合材料　航天用的先进复合材料（如 Kevlar 和石墨类复合材料），以往用硬质合金和 PCD，硬质合金的切削速度受到限制，而在 900℃以上高温下 PCD 刀片与硬质合金或高速钢刀体焊接处熔化，用陶瓷刀具则可实现 300m/min 左右的高速切削。

适于干切削工艺的刀具材料有陶瓷、金属陶瓷、涂层硬质合金及 PCBN。就热硬性和热稳定性来说，PCBN 是最适合高速干切削工艺的刀具材料，能获得比湿切削更高的刀具寿命。

1.1.3.2　高速加工刀具的结构

高速加工刀具系统由装夹刀柄与切削刀具组成，刀具系统的装夹刀柄与机床接口相配，切削刀具直接加工被加工零件。刀具系统接口技术包括刀具-刀柄接口

技术与刀具–机床接口技术。

1. 刀具-刀柄接口技术

刀柄对刀具夹持力的大小和夹持精度的高低，在高速加工中具有十分重要的意义。如果刀柄对刀具夹持不牢固，轻则降低加工精度，重则导致刀具及工件损坏，甚至引发安全事故。提高刀具系统夹持精度，就必须设法使刀具得到精密可靠定位；确保足够夹持力，就必须严格控制和提高刀具系统配合精度、加大夹持长度、优化结构设计及合理选材。目前，适宜高速加工的刀具夹头主要有以下几种：

（1）热缩夹头　利用刀柄装刀孔热胀冷缩使刀具可靠夹紧，它是一种无夹紧元件的夹头，结构简单对称，夹紧力大。

（2）高精度弹簧夹头　由日本大昭和精机株式会社生产的高精度弹簧夹头，采用锥角 12° 的锥套，所有夹头都经平衡修整，以适应高速加工的要求。目前，这种夹头的转速可达 30000～40000r/min。

（3）高精度液压夹头　BlG-PLUS 刀具系统的高精度液压夹头采用两点夹持的一体型构造，具有很高的夹持力和夹持精度，且减小了夹头重量。

（4）高精度静压膨胀式夹头　由德国雄克公司生产的高精度静压膨胀式夹头，通过拧紧加压螺栓提高油腔内的油压，使油腔内壁均匀对称地向轴线方向膨胀，以夹紧刀具。该夹头夹持精度极高，其径向圆跳动小于 3μm。

（5）三棱变形夹头　该夹头利用夹头本身的变形力夹紧刀具，其自由状态为三棱形。装夹刀具时，利用液力作用使夹头内孔变为圆形，撤销外力后，内孔重新收缩为三棱形，以实现对刀具三点夹紧。该夹头具有结构紧凑、定位精度高（可达 3μm 以下）且对称、刀具装夹简单等特点。

2. 刀具-机床接口技术

常规数控机床通常采用 7:24 锥度实心长刀柄的 BT 工具系统，目前共有五种规格且已实现标准化，即 NT（传统型）、DIN69893（德国标准）、ISO7388/1（国际化标准）、ANSI（美国标准）、ASME（美国标准）和 BT（日本标准）。其中，BT（7:24 锥度）刀柄结构简单、成本低以及使用便利而得以广泛应用，如图 1–12 所示。



图 1–12　BT 刀柄

BT 刀柄的锥度为 7:24，转速在 10000r/min 左右时，刀柄-主轴系统不会出现明显的变形。但当主轴转速从 10000r/min 升高到 40000r/min 时，由于离心力的作用，主轴系统的端部将出现较大变形。其径向圆跳动急剧增加到 15μm 左右。刀柄与主轴锥孔间将出现明显的间隙，严重影响刀具的切削特性，因此 BT 刀柄一

般不能用于高速切削。

为了克服传统刀柄仅仅依靠锥面定位导致的不利影响，一些科研机构和刀具制造商研究开发了一种能使刀柄在主轴内孔锥面和端面同时定位的新型连接方式——两面约束过定位夹持系统。该系统具有很高的接触刚度和重复定位精度，夹紧可靠。目前，该系统主要有短锥柄和 7:24 长锥柄两种形式。虽然 7:24 长锥柄具有与传统 BT 刀柄可以互换、可方便安装于主轴锥孔锥度为 7:24 的机床上、可提高刀柄与主轴的连接刚度和精度等优点，但从切削速度日趋提高的高速加工的发展趋势来看，锥度为 1:10 的短锥柄的刀柄结构的发展前景更为广阔。目前，短锥柄的两面约束刀柄主要有 HSK、KM、NT、BIG-PLUS 等几种。



图 1-13　HSK 工具系统

1）HSK 工具系统如图 1-13 所示。HSK（德文 Hohl Shaft Kegel 缩写）刀柄是由德国阿亨工业大学机床实验室研制的一种双面夹紧刀柄，为 1:10（2°51′78″）锥度，采用锥面（径向）和法兰端面（轴向）双面定位和夹紧，如图 1-14 所示。

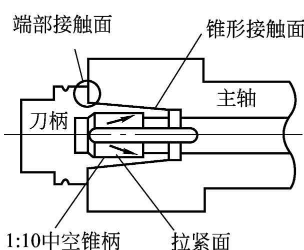


图 1-14　HSK 双面定位结构

工作时，空心短锥柄与主轴锥孔能完全接触，起到定心作用，保证主轴的连接刚性。在拉紧机构作用下，拉杆向右移动，此时刀柄前端锥面的弹性夹爪会径向扩张，同时夹爪的外锥面与空心短锥柄内孔的 30° 锥面开始接触配合。此时，空心短锥柄出现弹性变形，其端面与主轴端面靠紧，消除 HSK 刀柄法兰盘与主轴端面间隙（约 0.1mm）。

HSK 工具系统的突出特征是采用端面和锥面同步接触双重定位，保证配合可靠性。类似 BT 锥柄，HSK 刀柄的径向精度取决于锥面接触特性（二者的径向精度最高可达 0.2μm）。HSK 接口的轴向精度取决于接触端面，与轴向夹紧力无关，仅由结构决定，这与 BT 锥柄显著不同。HSK 刀柄的另一个特征是空心锥柄，以较小夹紧力产生足够弹性变形，空心薄壁的径向膨胀量与主轴内锥孔变形对应。空心柄部还为夹紧拉钉提供了安装位置，实现由内向外夹紧。空心柄部还可内置切削液。采用内夹紧方式可使离心力化为夹紧力，保证高速旋转的刀柄夹紧可靠。HSK 刀柄特征之三是采用 1:10 的小锥度，可减小锥面部分的夹紧力，提高 HSK 接口的承载能力，同时又能够保证锥部良好的定位作用。

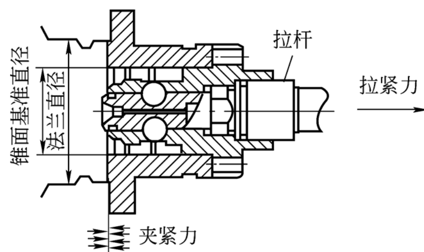


图 1-15　KM 工具系统

2）KM 工具系统如图 1-15 所示。KM 刀柄是 1987 年美国 Kennametal 公司与德国

Widia 公司联合研制的 1:10 短锥空心刀柄，其长度仅为标准 7:24 锥柄长度的 1/3。在夹紧机构拉杆上设有两个对称的圆弧凹槽，该槽底为两段弧形斜面。夹紧刀柄时，拉杆向右移动，钢球沿凹槽的斜面被推出，卡在刀柄上的锁紧孔斜面上。刀柄向主轴孔内拉紧后，薄壁锥柄产生弹性变形，使刀柄端面与主轴端面贴紧，实现锥面和端面同时接触双面定位。

KM 系统采用三点接触和双钢珠锁定的方式连接，使 KM 系统具有刚度高、精度高、装夹快捷和维护简单等优点。研究表明，与 BT 刀柄相比，HSK 刀柄和 KM 刀柄具有更好的静刚度和动刚度。KM 刀柄的拉紧力、锁紧力和动刚度值明显大于 HSK 刀柄，整体性能最佳。由三者的结构及性能比较（表略）可知，KM 刀柄也存在一些不足，例如有较大过盈量，所需的夹紧力至少是 HSK 的 3 倍。

3）Big-plus 工具系统。Big-plus 刀柄由日本大昭和精机公司（Big-Daishowa Seiki）研制，并且成功申请了专利进行技术保护，与 7:24 刀柄可兼容互换。Big-plus 工具系统结构利用主轴内孔的弹性膨胀锁紧后补偿间隙，缩小刀柄装入主轴后与端面的间隙，保证刀柄与主轴端面配合。工作时，刀柄装入主轴后，在主轴端面与刀柄法兰之间留有约 0.02mm 的间隙，当刀柄被拉紧后，主轴端口弹性扩张，实现锥面与端面的同时接触，避免因主轴的扩张造成刀柄的轴向移动。Big-plus 工具系统主轴和刀柄的制造精度非常高，保证系统的整体性能，被日本高速机床厂商普遍采用。

与 BT 锥柄相比，Big-plus 锥柄的弯矩承载能力因有一支撑直径而提高，增强了装夹稳定性。Big-plus 工具系统刚性高，有衰减振动功能，在高速切削时可减少刀柄跳动，提高重复换刀精度，延长刀具的寿命，在高速加工领域可获得较高的加工精度。

4）Showa D-F-C 工具系统。Showa D-F-C 刀柄是由日本圣和精机株式会社开发的，其柄部为 7:24 锥度圆柱形，圆柱面上配有带外锥面的锥套，锥套大端与刀柄本体的法兰端面之间设有碟形弹簧，具有缓冲吸振和双面定位的作用。

刀柄采用锥套碟形弹簧的组合式结构，通过移动锥套，可以补偿锥部基准圆的微量轴向位置误差，能可靠地实现双向约束。当锥孔因离心力作用扩张时，在碟形弹簧的作用下，锥套产生轴向位移，补偿径向间隙，确保径向精度。碟形弹簧还能衰减切削时的微量振动，有利于提高刀具寿命、改善加工表面质量。该结构设计还解决了 HSK、KM、Big-plus 等双面定位型结构在刀柄和主轴锥孔磨损后，锥面定位性能下降的问题。但是刀柄上锥套孔因离心力发生扩张，使 Showa D-F-C 柄部圆柱体出现间隙，径向刚度和径向位置精度有所下降。

5）Lock 工具系统。Lock 刀柄是日本株式会社日研工作所开发出的 7:24 锥度双面定位型结构。其柄部为圆柱体和圆锥体的组合，在该复合体上附带锥套，锥套大端与刀柄本体的法兰端面之间安置碟形弹簧，锥套小端通过细牙锁母定位和锁紧。

Lock 刀柄的最大特点是用端面、锥面和锥套内孔三处锁紧，与两面接触高速

刀柄所不同的是，仅端面与锥面接触、三处锁紧，保证高速旋转时系统的可靠性。三面定位避免因离心力导致锥套孔与柄部体产生间隙，提高系统径向刚度和径向位置精度。但是 Lock 刀柄锥套有开口缝，对动平衡精度有一定影响。

1.2　数控高速加工工艺

加工工艺是学习高速加工的重要内容，本节对数控高速加工的工艺特点、切削用量以及路径规划进行重点介绍。

1.2.1　高速加工的工艺特点

1．高速加工工艺的关键

1）保持切削载荷平稳。

2）最小的进给率损失。

3）最大的程序处理速度。

其中，控制切削载荷最为重要，它是实现后两点的基础。一般来说，粗加工采用常规加工，因为它有较高的金属去除率；精加工采用高速加工，它能达到很高的走刀速度，并能切削更多的表面积（小零件粗加工到精加工都可采用高速加工）。但是在粗加工后的半成品工件上的残留毛坯，需要用半精加工去除那些不均匀的多余材料，留下一个余量比较均匀的半成品毛坯，为精加工采用高速加工创造条件。

2．高速加工遵循的原则

1）在高速加工中，尽可能增加切削时间在整个工作时间的比例，减少非加工时间（如换刀、调整、空行程等）。

2）高速加工不仅仅是高的切削速度，应该把它看成一个过程，各个工序转接要流畅，需要对高速加工工艺规划进行非常细致的设计。要把粗加工、半精加工和精加工作为一个整体来考虑，设计出合理的加工方案，从总体上达到高效率和高质量的要求，充分发挥高速加工的任务，这就是高速加工工艺规划的原则。

3）高速加工不一定就是高的主轴转速，许多高速切削的应用是在中等主轴转速下用大尺寸刀具完成的。

4）高速加工可以对淬硬材料进行加工，例如在精加工淬硬的钢材时，可采用比常规加工高 4～6 倍的切削速度和进给率。

5）高速加工是一种高效加工，一般来说，对于小尺寸的工件，适合从粗加工到精加工；对于大尺寸的工件，适合精加工和超精加工。

1.2.1.1　高速加工刀具路径的特点

综合已有的一些实践经验和理论分析结果，高速加工刀具路径具有以下特点：

1）加工余量的清除一般宜用系列刀具分别进行粗加工、半精加工和精加工的分段处理，不应用单一小刀具一次完成加工。

2）采用工序集中的原则和合理的工件装夹位置和方式，力求一次装夹定位完成工件的全部加工。

3）高速铣削加工中，尽量采用顺铣加工。因为顺铣时刀具切入工件的切削厚度由最厚逐渐变化到最薄，切削刃受力状态好，产生热量比逆铣少，有利于延长刀具寿命。

4）要保持金属去除率恒定，应该用高切速、小切削深度（切削深度不宜大于0.2mm）进行加工，以保证切削载荷的恒定，获得较好的切削热转移和加工质量。

5）要尽量不中断切削过程和刀具路径，减少刀具切入切出工件的次数；尽量避免刀具的急剧转向；在进退刀和从一个切削层进入到另一个切削层时，应采用螺旋、圆弧或斜线进出工件，以获得相对平稳的切削过程。

6）加工凹凸角时，应采用圆弧速度补偿选项，调节刀具在拐角处的进给速度，但切削刃的切削速度仍保持恒定，以获得光滑的表面。

7）在生成加工程序前，应对刀具路径进行优化，合并或取消那些零碎的、短的刀位轨迹，合理安排切削区域的加工顺序，减少进退刀次数和空刀移动的距离等，在保证加工精度要求的前提下，尽量减少程序段数。

8）小的背吃刀量，一般来说不大于刀具直径的 10%，大量采用小层深的分层切削。

总之，相对于传统数控编程而言，高速加工要求刀具路径平稳、切削负荷稳定、空行程尽量短、切削效率高，且要求刀具路径必须有很高的安全性。

1.2.1.2 高速加工 CAM 软件的特点

CAM 是计算机辅助制造软件的统称，它与机床和刀具系统配合，可高速高效地加工出合适的零件。由于高速加工工艺要求与传统加工工艺要求不同，因此，用于高速加工的 CAM 数控自动编程系统也需要有其特殊的功能。为了使软件和设备能够协调“高速”，高速加工 CAM 软件必须具有以下功能：

（1）具有高计算量的编程速度　高速加工中采用极小的进给量和切削深度，单步量大，故数控程序比传统的程序要大得多，没有很高的运算处理能力，是无法配合机床运动以及数控系统的执行速度的。快的编程速度，使操作人员能够对多种加工策略进行比较，采取适当的工艺方法，对刀具轨迹进行编辑、调整和优化，以达到最佳的加工效率。

（2）具有全程自动防过切处理能力及自动刀具干涉检查　超过传统加工 10 倍以上切削速度的高速加工，如果发生过切，则后果不堪设想。所以，一个 CAM 系统必须具有全程自动防过切处理能力。传统的 CAM 系统对局部加工编程时，没有考虑整

个工件的情况，这样极其容易发生过切现象。当过切发生时，只是靠人工的选择干预的方法来防止，很难保证全局防护的安全性。另外，高速加工的重要特征之一是能够使用较小直径的刀具来加工零件的细部结构，CAM 系统必须能够自动地提示最短刀具系统（含刀头、刀柄和刀夹）的长度，自动进行刀具干涉检查。

（3）具有进给率优化处理功能　为了既能够确保最大的切削效率，又要保证高速加工时的安全性，CAM 系统必须能够根据加工时余量的大小，自动调整进给率，保证加工刀具受力状态的平稳性。

（4）具有丰富的符合高速加工要求的加工策略　与传统加工方式相比，高速加工对工艺走刀方式有其特殊的机能要求，因而要求相配备的 CAM 系统能够满足以下要求：

1）避免走刀时刀具轨迹的突然变化，保持加工过程中刀具轨迹的平稳和连续性；避免突然加速或减速导致因局部过切而造成刀具和设备的损坏。

2）下刀或刀行间过渡部分采用斜式下刀或圆弧下刀，避免直上直下地下刀。

3）行切的端点采用圆弧连接，避免直线连接。

4）除非必须使用，应尽量避免全刀宽切削。

5）残余量加工或清根加工时，应采用多次加工或采用系列刀具从大到小分次加工，避免用小刀一次加工完成。

6）为了避免多余的空刀造成重复计算，对 CAM 系统的刀具轨迹编辑优化功能要求很高。通过这些功能对刀具轨迹进行镜像、复制、旋转等操作，还可以精确裁减空刀数量，以提高效率。此外，还可以对零件的局部变化进行编程和计算，无须每一次都对整个模型重新编程。

（5）具有崭新的编程方式　虽然采用高速加工设备后，对编程人员的需求量增加，但是 CAM 系统的使用将是越来越简单和方便化，应更贴近于车间加工操作人员，而不是更多地依靠技术工程师坐在设计中心的大楼里编写“理论”程序。随着 CAM 技术智能化水平提高，编程人员只需输入加工工艺就可以完成自动化的编程操作。程序编制的复杂程度与零件的复杂程度无关，只与加工工艺有关，故非常易于掌握和学习。

1.2.2　高速加工切削用量的选择

高速加工切削用量的选择主要考虑加工效率、加工表面质量、刀具磨损和加工成本。不同刀具加工不同工件材料时，切削用量会有很大差异。

1.2.2.1　切削用量选择的原则

切削用量主要包括切削速度、进给量和背吃刀量。高速铣削用量一般选择高的切削速度 V_c、中等的每齿进给量 f_z、较小的背吃刀量 a_p、适当大的侧吃刀

量 a_e。例如：典型整体硬质合金立铣刀（采用 TiCN 或 TiAlN 涂层）切削 48～58HRC 淬硬钢时，粗加工选择 V_c=100m/min，a_p=（6%～8%）D（刀具直径），a_e=（35%～40%）D，f_z=0.05～0.1mm/z；半精加工选择 V_c=150～200m/min，a_p=（3%～4%）D，a_e=（20%～40%）D，f_z=0.05～0.15mm/z；精加工选择 V_c=200～250m/min，a_p=0.1～1.2mm，a_e=0.1～0.2mm，f_z=0.02～0.2mm/z。

1．**刀具直径和有效直径**

高速铣削用量与刀具材料关系密切，不同刀具牌号所需的铣削用量不同。另外需要注意的是，由于球头铣刀实际参与切削部分的直径和加工方式有关，在选择铣削用量时，要考虑刀具直径 D 和有效直径 D_{eff} 的关系，如图 1-16 所示。

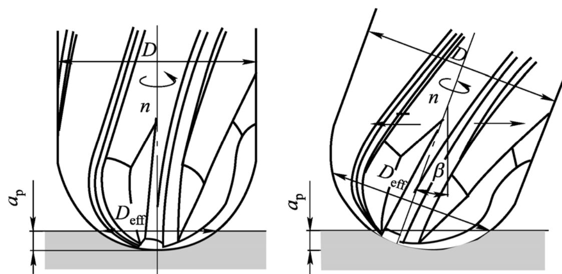


图 1-16 各种铣削方式下的铣刀直径

对于分层铣和面铣等，有效直径为

刀轴直立 $$D_{eff}=2\sqrt{Da_p-a_p^2} \qquad \beta=0$$

刀轴倾斜 $$D_{eff}=D\sin\left[\beta\pm\arccos\left(\frac{D-2a_p}{D}\right)\right] \qquad \beta\neq 0$$

铣刀实际参与切削部分的最大线速度定义为有效线速度，球头铣刀的有效线速度为

刀轴直立 $$V_{D_{eff}}=\frac{\pi n}{1000}\times 2\sqrt{Da_p-a_p^2} \qquad \beta=0$$

刀轴倾斜 $$V_{D_{eff}}=\frac{\pi n}{1000}D\sin[\beta\pm\arccos\left(\frac{D-2a_p}{D}\right)] \qquad \beta\neq 0$$

采用球头铣刀加工时，如果背吃刀量小于刀具半径，则有效直径将小于铣刀名义直径，有效速度也将小于名义速度；当采用圆弧铣刀浅切削深度时，也会出现上述情况。在优化加工参数时，应该按有效铣削速度选择。

2．**选择侧吃刀量**

在应用球头铣刀进行精加工曲面时，为了获得较好的表面粗糙度，减少或省去手工抛光，侧吃刀量最好和每齿进给量相等，这样加工出的表面纹理比较均匀，

而且表面质量很高，如图 1-17 所示。

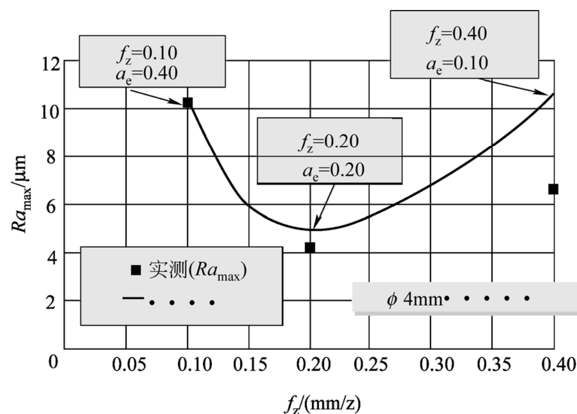


图 1-17　侧吃刀量与每齿进给量对表面粗糙度的影响

3. 选择背吃刀量

背吃刀量是制定合理的高速切削用量的重要参数。它由刀具长度、刀具的长径比以及工件材料的硬度等因素确定。对较硬材料的铣削，背吃刀量 a_p 可由下式计算：

$$a_p = RC_1C_2$$

式中，R 为刀具圆角半径，C_1 为材料的硬度系数，C_2 为刀具的长径比系数。C_1 与 C_2 如图 1-18 和图 1-19 所示。可见当材料硬度和刀具的长径比达到一定程度（材料硬度 50HRC，长径比>5）时，材料硬度系数和刀具长径比系数急剧下降，允许的背吃刀量也随之急剧下降，这种情况要尽量避免。

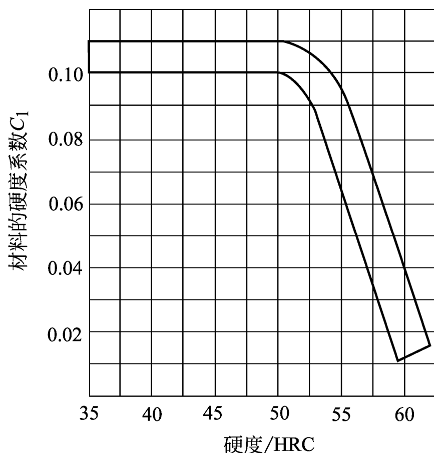


图 1-18　材料的硬度系数

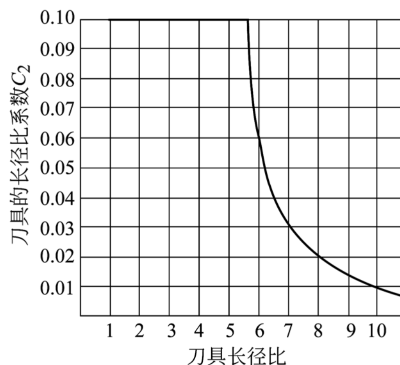


图 1-19　刀具的长径比系数

1.2.2.2 常用材料的切削用量

1. 钢的高速铣削用量

当铣削材料为淬硬工具钢时，硬度为 48～52HRC，常用的高速铣削用量如表 1-5 所示。

表 1-5 钢的高速铣削用量

刀具直径 D/mm	铣削速度 V_c/（m/min）	每齿进给量 f_z/（mm/z）	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm	主轴转速 n/（r/min）	进给速度 V_f/（mm/min）
2	113～132	0.04～0.07	0.05～0.06	0.04～0.10	60000	4800～8400
3	151～188	0.05～0.08	0.05～0.08	0.05～0.20	60000	6000～9600
4	210～226	0.05～0.08	0.10	0.05～0.25	55710～60000	6000～8915
5	210～283	0.05～0.10	0.10～0.12	0.05～0.30	47750～60000	6000～9550
6	210～339	0.06～0.11	0.10～0.14	0.06～0.35	44560～60000	7200～9805
8	210～380	0.07～0.13	0.15～0.16	0.07～0.45	30390～54000	7560～7900
10	210～380	0.08～0.17	0.15～0.18	0.08～0.60	27850～45460	7278～9470
12	210～380	0.09～0.20	0.20	0.09～0.70	21560～39370	7087～8625
16	210～380	0.10～0.25	0.25	0.10～0.95	16710～30480	6096～8355
20	210～380	0.10～0.28	0.30	0.10～1.15	13640～24880	4976～7640

2. 高硬材料的高速铣削用量

当铣削材料为淬硬工具钢、弹簧钢时，硬度为 52～56HRC，常用的高速铣削用量如表 1-6 所示。

表 1-6 高硬材料的高速铣削用量

刀具直径 D/mm	铣削速度 V_c/（m/min）	每齿进给量 f_z/（mm/z）	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm	主轴转速 n/（r/min）	进给速度 V_f/（mm/min）
2	113～132	0.04～0.07	0.05～0.06	0.04～0.10	60000	4800～8400
3	151～188	0.05～0.08	0.05～0.08	0.05～0.20	60000	6000～9600
4	180～226	0.05～0.08	0.10～0.10	0.05～0.25	47750～60000	6000～7640
5	180～283	0.05～0.10	0.10～0.12	0.05～0.30	40930～60000	6000～8185
6	180～300	0.06～0.11	0.10～0.14	0.06～0.35	38200～52720	6326～8405
8	180～300	0.07～0.13	0.15～0.16	0.07～0.45	26040～42630	5968～6770
10	180～300	0.08～0.17	0.15～0.18	0.08～0.60	23870～35910	5746～8115
12	180～300	0.09～0.20	0.20	0.09～0.70	18480～31080	5594～7390
16	180～300	0.10～0.25	0.25	0.10～0.95	14320～2460	4812～7160
20	180～300	0.10～0.28	0.30	0.10～1.15	11690～19640	3928～6545

3．轻合金的高速铣削用量

当铣削材料为铝合金时，常用的高速铣削用量如表 1-7 所示。

表 1-7　铝的高速铣削用量

刀具直径 D/mm	铣削速度 V_c/（m/min）	每齿进给量 f_z/（mm/z）	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm	主轴转速 n/（r/min）	进给速度 V_f/（mm/min）
2	132	0.04	0.06	0.04	60000	4800
3	188～450	0.05～0.10	0.08～0.75	0.05～1.50	60000	6000～12000
4	226～600	0.05～0.12	0.10～1.0	0.05～2.00	60000	6000～14400
5	339～750	0.06～0.15	0.14～1.25	0.06～2.50	60000	6000～18000
6	339～900	0.06～0.18	0.14～1.50	0.06～3.00	60000	7200～21600
8	415～1200	0.07～0.20	0.16～2.00	0.07～4.00	47750～60000	8400～19100
10	509～1200	0.08～0.22	0.18～2.5	0.08～5.00	38200～60000	9600～16810
12	584～1200	0.09～0.25	0.20～3.00	0.09～6.00	31830～60000	10800～15915
16	754～1200	0.10～0.28	0.25～4.00	0.10～8.00	23780～60000	12000～13365
20	924～1200	0.10～0.30	0.30～5.00	0.10～10.0	19100～60000	12000～11460

4．不锈钢、钛合金的高速铣削用量

当铣削材料为不锈钢、钛合金时，常用的高速铣削用量如表 1-8 所示。

表 1-8　不锈钢、钛合金的高速铣削用量

刀具直径 D/mm	铣削速度 V_c/（m/min）	每齿进给量 f_z/（mm/z）	背吃刀量 a_p/mm	侧吃刀量 a_e/mm	主轴转速 n/（r/min）	进给速度 V_f/（mm/min）
2	132	0.04	0.06	0.04	60000	4800
3	188	0.05	0.08	0.05	60000	6000
4	226	0.05	0.10	0.05	60000	6000
5	240	0.05	0.12	0.05	49920	4992
6	240	0.06	0.14	0.06	42170	5060
8	240	0.07	0.16	0.07	34110	4775
10	240	0.08	0.18	0.08	28730	4597
12	240	0.09	0.20	0.09	24860	4475
16	240	0.10	0.25	0.10	19250	3850
20	240	0.10	0.30	0.10	15710	3142

1.2.3　高速加工路径规划

根据高速加工的工艺特点，在做高速加工编程时，要进行必要的刀具路径规划，包括进退刀模式、走刀模式、移刀模式和刀具路径的拐角模式等。

1.2.3.1　高速加工进退刀模式

传统数控加工进退刀为直上直下的方式，这种方式的优点是比较直接，不需要太多的计算；缺点是刀具直接向工件垂直切入加工，会产生较大的冲击力，对刀具提出了很高的要求，并且这种进刀方式也不容易排屑，产生大量的热不容易

散发，刀具和工件的变形加大，如图 1-20 所示。

斜向进退刀时，由于采用侧刃切削工件，加工时需要设置两个角度：X-Y 平面角度。从垂直方向看时，刀具轨迹与 X 轴的夹角通常为零；与工件的夹角，即刀具切入加工面的角度，如图 1-21 所示，这个角度设置时，如果选取得太小，则刀具每次切入深度较浅，有利于保护刀具和工件，但是，这也造成切入斜线增长，加工路线加长。

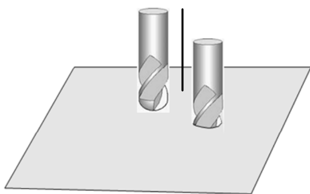


图 1-20　直上直下的方式进退刀

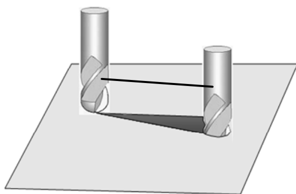


图 1-21　斜向进退刀

高速加工中，为了使刀具在工件表面上平稳起降，通常尽量采用轮廓的切向进退刀方式，如图 1-22 所示。在对曲面进行加工时，刀具可以是 Z 向垂直进退刀、曲面法向进退刀、曲面正向与反向切向进退刀和斜向或螺旋进退刀。根据实际加工效果，曲面的切向进退刀和螺旋进退刀更适合高速加工。

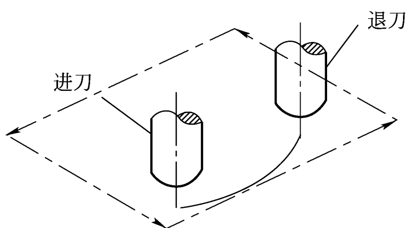


图 1-22　切向进退刀

1.2.3.2　高速加工走刀模式

高速加工走刀应避免刀具轨迹中走刀方向的突然变化，以免因局部过切而造成刀具或设备的损坏；走刀速度要平稳，避免突然加速或减速，避免多余空刀，应采用光滑的转弯走刀。高速加工走刀模式如下：

（1）平行铣削　平行铣削是最常用的走刀方式，采用平行扫描线的形式对多张曲面构成的模型进行加工，如汽车覆盖件模具加工。

（2）环形铣削　同时对多个曲面进行加工的计算方法，其走刀路线是以外轮廓的形状由外向内进行走刀。

（3）摆线走刀　摆线走刀是高速加工典型的刀位轨迹策略，摆线相当于一个圆沿着一条曲线作纯滚动时，圆上某一固定点的轨迹，如图 1-23 所示。采用这种刀具轨迹是刀具在切削时距某条曲线保持一个恒定的半径，从而可使进给速度在加工过程中保持不变，刀具寿命较长。

（4）等高线层切法　将零件分成若干层，一层一层逐层往下切，在每层中将零件所有区域加工完后再进行下一层。每一层均采用螺旋或圆弧进刀，同时采用无尖角刀具轨迹，这样有利于排屑，也避免了切削力发生突变，如图 1-24 所示。

特别是对薄壁零件来说，更应采用这种刀具轨迹，因为这种刀具轨迹在切削过程中能保持薄壁较高的刚性。

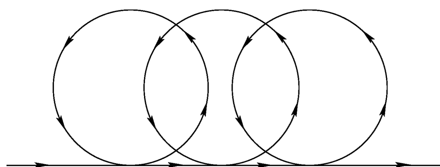


图 1-23　摆线示意图

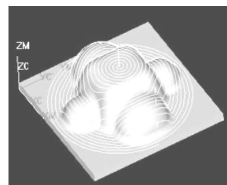


图 1-24　等高线层切方式

1.2.3.3　高速加工移刀模式

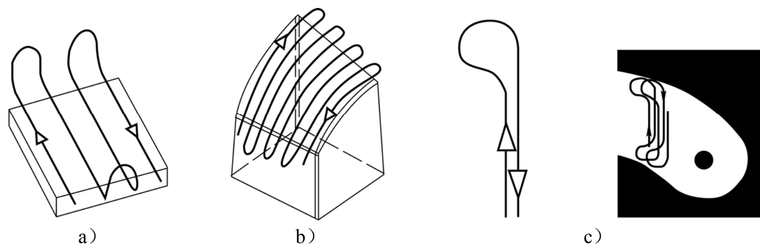
移刀方式主要是指高速加工行切时的行间移刀、环切中的环间移刀、等高加工的层间移刀等。普通数控的移刀模式不适合高速加工的要求，如行切移刀时，刀具多是直接垂直于原来行切方向的法向移刀，致使刀具路径中存在尖角；在环切的情况下，环间移刀也是从原来轨迹的法向直接移刀，也致使刀具路径轨迹存在不平滑的情况；在等高加工中的层间移刀时，也存在移刀尖角。这些都导致高速机床频繁地加减速，影响了加工效率，阻碍了高速加工的发挥。

1．行切移刀

对于大平面或相对平坦轮廓的切削，行切方式较为高效、便捷，主要有以下几种：

（1）采用切圆弧连接　在行切削量较大的情况下，处理得很好；在行切量（行间距小于 0.2mm）较小的情况下，由于圆弧半径过小，导致圆弧接近一点，即近似为行间的直接直线移刀，从而导致机床频繁地加减速，影响加工效率，对机床不利。

（2）采用内侧或外侧圆弧过渡移刀　在使用小直径刀具进行精加工时，由于刀路轨迹间距非常小，使用切圆弧移刀效果不理想，可采用内侧或外侧圆弧移刀，如图 1-25 所示。



a）　b）　c）

图 1-25　行切移刀方式

a）空间内向圆弧走刀　b）空间外向圆弧走刀　c）高尔夫球杆头式抬刀过渡走刀

（3）高尔夫球杆头式移刀　由于该种移刀方式的轨迹像高尔夫球杆头，故称为高尔夫球杆头式移刀，它克服了切圆弧半径过小而导致圆弧接近一点。

2. **环切移刀**

采用环间圆弧连接时，移刀轨迹直接在两个刀具路径轨迹之间生成圆弧，在间距较大的情况下，会产生过切。因此，该方法一般多用于两轴半加工，所有的加工都在一个平面内，如图 1-26 所示。

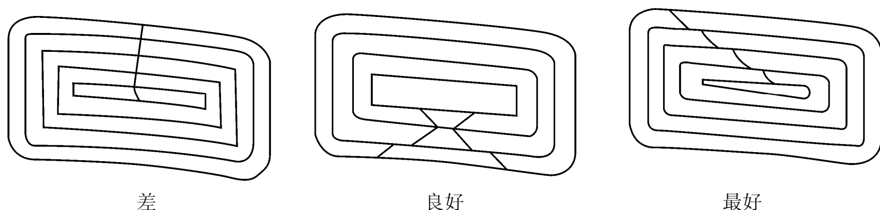


图 1-26 环切移刀

3. **层间移刀**

在进行等高加工时，可采用螺旋式等高线间的移刀。

1.2.3.4 高速加工拐角模式

部分工件的外形轮廓为直角，刀具轨迹只能沿着轮廓直角进给，会导致速度变化很大。进给速度的急剧变化，会造成刀具磨损、刀具高速运动到转角处发生前冲超过工件而过切等。

在工件外形轮廓转角处采用圆滑过渡的方式，如图 1-27 所示。在工件内部圆角如果采用等半径的刀具直接加工，进给方向发生突变，势必会使机床负荷猛然增加。加工这种类型的圆角最好使用较小半径的刀具，一般情况下刀具半径最好较圆角几何尺寸小 70%或更小，这样可使拐角处的切削刀具进给方向变化平滑，避免刀具的突然转向。使用小直径刀具加工和直接切入拐角相比，机床负荷可以降低约原来的 1/3。

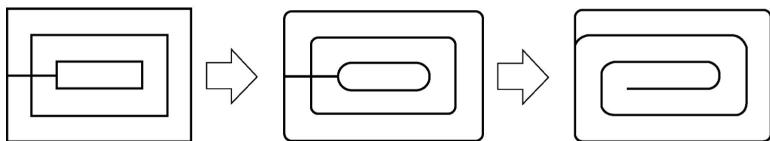


图 1-27 工件外形轮廓转角处圆滑过渡

1.3 本章小结

本章对数控高速加工的基础专业知识进行了简要介绍，包括加工机床、加工刀具以及加工工艺等内容。其中，加工工具的选择、加工切削用量的选择是重点。另外，高速加工路径规划包括进退刀模式、走刀模式、移刀模式和刀具路径的拐角模式等，建议读者学习时进行前后比较。了解和熟悉这些加工模式设置，对后面加工实例的学习有良好的辅助作用。

第 2 章　Cimatron E9.0 高速加工技术

Cimatron E9.0 多轴高速加工技术主要包括三轴高速加工、四轴高速加工和五轴高速加工。其中三轴高速加工所采用的技术主要有体积铣、曲面铣、局部操作、局部精细加工；四轴高速加工技术主要有四轴局部操作加工和四轴轮廓铣；而五轴高速加工包括航空铣以及侧刃铣等专用加工模块。它们提供了丰富的刀轴控制方法。下面对这三种技术进行详细讲解。

2.1　Cimatron E9.0 三轴高速加工技术

三轴高速加工就是机床的 X、Y、Z 三轴能同时在运动中进行加工。Cimatron E9.0 三轴高速加工技术包括体积铣、曲面铣、局部操作加工、局部精细加工等，其中局部操作加工将在 4 轴加工技术中详细介绍。下面仅介绍其他三种加工方法。

2.1.1　体积铣

体积铣时最常用的三轴曲面粗加工方式，采用层铣加工方式。系统按照零件在不同深度的截面形状、计算各层的刀路轨迹。体积铣可完成复杂曲面零件从毛坯到成品的大量材料切除过程，适用于绝大多数粗加工，如模具的型腔或型芯及其他带有复杂曲面的零件粗加工。Cimatron E9.0 常用的体积铣加工类型有：粗行切、粗环切和二次开粗。

2.1.1.1　体积铣—粗行切

粗行切是一种比较常用的体积铣粗加工方法，它生成一组相互平行的切削粗加工刀具路径。在粗加工时，行切具有最高的效率，一般其切削步距可以达到刀具直径的 70%～90%，如图 2-1 所示。

图 2-2 为体积铣粗行切的“NC Process Manager”对话框，利用该对话框可设置体积铣的加工参数，包括“刀路参数”、“刀具和卡头”、“机床参数”和“零件”4 个部分。

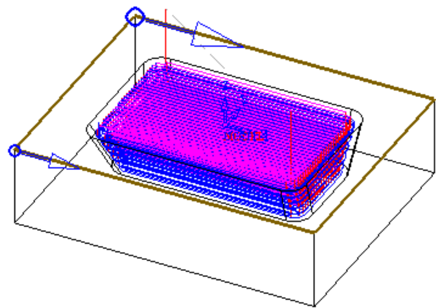


图 2-1 粗行切示例

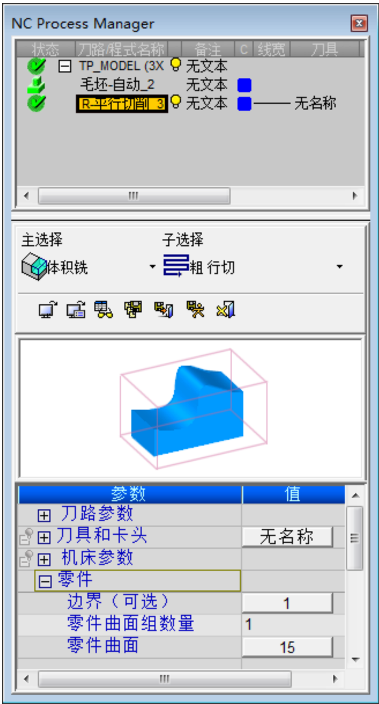


图 2-2 粗行切加工

“NC Process Manager”对话框

1. 刀路参数

刀路参数用于设置生成的刀具路径的各种细节参数，如图 2-3 所示。它将影响到加工程序的质量（包括切削加工后的表面质量）、加工效率、刀具寿命、程序的安全性等。在选择工艺方式、加工对象、刀具之后，需要进行刀路参数的设置。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊞ 安全平面	
⊞ 进刀和退刀点	优化
⊞ 边界设置	
⊞ 精度和曲面偏移	基本参数
⊞ 电极加工	☐
⊞ 刀路轨迹	
⊞ 限制Z值	缺省参数
⊞ 层间铣削	基本参数
⊞ 高速铣	缺省参数
⊞ 毛坯管理与夹头检	缺省参数
⊞ 创建辅助轮廓线	☐

图 2-3 刀路参数

1）安全平面。安全平面用于设置刀路在两个切削区域之间或者两切削层之间转换的相关高度，是为了避免刀具在快速移动过程中与工件发生碰撞事故，同时也防止直接进刀（工厂常称为“踩刀”）现象的发生。安全平面的相关参数如图 2-4 所示。

- 【使用安全高度】：选中该复选框，刀具将先运动到安全平面，再进行切削，完成切削后，也将返回该平面；取消该复选框，在开始切削将直接进到切削开始位置，在切削完成后也不抬刀，如图 2-5 所示。

参数	值
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	50.0000 ƒ
内部安全高度	优化
垂直安全距离	0.0000 ƒ
坐标系名称	MODEL

图 2-4　安全平面参数

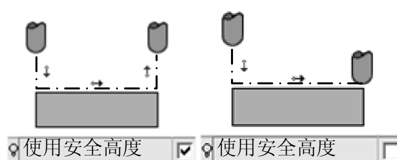


图 2-5　使用安全高度示意图



注意

"使用安全高度"选项推荐选中，否则刀具路径将存在较大的安全隐患，例如直接进入切削位置过程中的干涉，另外在完成加工后不抬刀。

- 【安全平面】：用于设置刀具在加工过程中横越工件时，不和工件发生碰撞的高度值，如图 2-6 所示。安全平面可以直接输入数值，也可以在图形上选择一点，以该点的 Z 坐标值作为安全平面。安全平面设置值一般应高于工件及夹具的最高点，这样在安全平面上移动时能保证不与工件或夹具碰撞。
- 【内部安全高度】：用于指定在一个加工区域内，进行两行之间移动时的提刀高度，包括"绝对"和"优化"两种方式。
  - 〖绝对〗：采用绝对方式时，刀具提刀到指定的绝对值 Z 高度，再移动到下一行切削的起始位置下刀进行切削，如图 2-7 所示。使用这种方式需要指定绝对值 Z 数值，具有较高的安全性。
  - 〖优化〗：刀具在两个区域的进入点和结束点之间进行连接。如果两个区域之间有障碍物，还要增加额外的高度，使其更安全，如图 2-8 所示。
- 【坐标系名称】：指定的安全平面以及绝对值 Z 都是相对于这个坐标系的。单击坐标系名称后的按钮可以在图形上或者在下拉列表中选择坐标系。一个工件的加工编程一般不应改变坐标系。

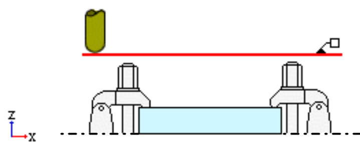


图 2-6　安全平面示意图



图 2-7　绝对

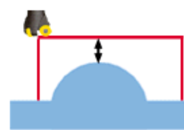


图 2-8　优化

2）进刀和退刀点。进刀和退刀点主要用于设置进刀方式。进刀和退刀点参数如图 2-9 所示。

- 【进入方式】：包括“优化”、“用长度”、“不插入”和“钻孔”等4个选项，下面分别加以介绍：
  - 〖优化〗：使用这种方式，系统将自动选择加工时间最短的进刀方式。系统将对比插入切削时间（插入进刀总长度×插入进给率）与进刀切削时间（水平进刀长度×水平进刀进给率），选择时间较短的进刀方式。
  - 〖用长度〗：定义一个最大长度范围，用于在该范围内寻找一个空的插入点，当在该范围内没有插入点时，使用螺旋下刀方式进刀。使用该方式时，将需要定义最大长度。它与优化方式的区别在于优化使用在材料以外下刀。
  - 〖不插入〗：使用该方式时，只能进行水平切入，不允许在材料上方进行下刀。
  - 〖钻孔〗：使用该方式时，刀具类似于钻孔方式直接下刀。这种下刀的距离最短，特别适合于材料硬度较低的工件，但要使用具有端部切削能力的槽铣刀。

参数	值
进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	15.0000
最小切削宽度	0.0200
最大螺旋半径	4.8000
螺纹铣	40.0000
进刀/推刀 - 轮廓外	☑

图 2-9 进刀和退刀点参数

- 【进刀角度】：用于设置螺旋式下刀。采用螺旋下刀有利于改善刀具插入时的切削负荷。进刀角度为90° 表示垂直下刀；当进刀角度小于90° 时，刀具将以螺旋方式切入材料，如图2-10所示。螺旋半径由最大螺旋半径决定。

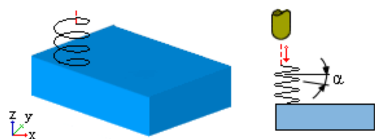


图 2-10 进刀角度



注意

要产生螺旋进刀方式，只能在进入方式设置为“优化”或者“用长度”时允许使用。

- 【最小切削宽度】：刀具进刀时在XY方向的最小切削宽度，如图2-11所示。
- 【最大螺旋半径】：用于输入螺旋式进刀时的螺旋半径，如图2-12所示。

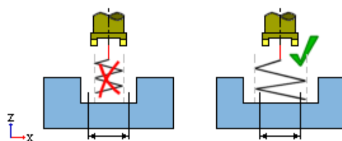


图 2-11 最小切削宽度

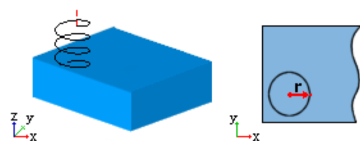


图 2-12 最大螺旋半径

3）边界设置。边界设置用于设置刀具与加工边界的相对关系，包括“刀具定位”和“轮廓偏移”等，如图 2-13 所示。在调整加工范围的时候，一种方法是直接通过刀具与边界位置进行调整（刀具与边界有 3 种关系：在轮廓上面、在轮廓内部、在轮廓外部）；二是通过轮廓偏移值进行范围调整，负偏移值扩大边界范围，正偏移值结果是缩小边界范围。

● 【刀具定位】：用于设置刀具相对于边界轮廓位置。针对不同的轮廓可以设置不同的刀具位置，如图 2-14 所示。

参数	值
边界设置	
刀具定位 (公共的)	在轮廓上
边界偏移	0.000000

图 2-13　边界设置

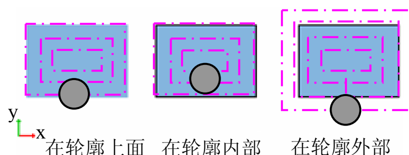


图 2-14　刀具定位

● 【边界偏移】：用于输入轮廓偏移值，负偏移值扩大边界范围，正偏移值缩小边界范围，如图 2-15 所示。

4）精度和曲面偏移。精度和曲面偏移用于设置零件加工精度和曲面精度，如图 2-16 所示。

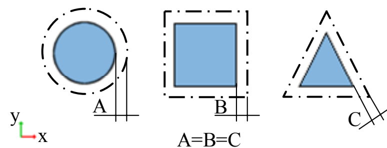


图 2-15　边界偏移

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-16　精度和曲面偏移

● 【零件加工余量】：一般零件在粗加工时需要留加工余量。根据工件材料、刀具长度和材料、曲面公差等，加工余量至少设定为曲面允差的 5 倍，以避免行间或层间的过切发生。零件加工余量可设置为负值或者正值，如图 2-17 所示。

● 【曲面精度】：曲面精度决定了刀具路径逼近曲面时的最大偏差，如图 2-18 所示。零件曲面精度越高，则加工得到曲面与设计曲面越接近；零件曲面精度较低，则与零件的偏差越大，但生成程序的计算要快得多。粗加工偏差一般可以设定为加工余量的 10%～30%，即 0.1～0.2mm；半精加工设置为 0.05～0.1mm；精加工偏差控制在标注尺寸公差的 1/5～1/10，即 0.01～0.05mm。

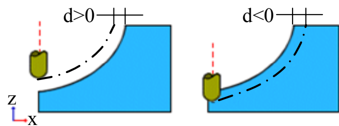


图 2-17　零件加工余量

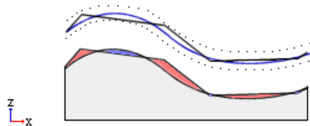


图 2-18　曲面精度

5）刀路轨迹。刀路轨迹的参数相对较多，而且不同加工方式，甚至于不同的加工对象、不同的上级参数设置都会引起参数表显示的局部变化。粗行切刀路轨迹参数如图 2-19 所示。

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
切削方向	顺铣
垂直步进类型	固定 + 水
固定垂直步进	8.0000
侧向步长	4.0000
从安全平面到固定	
加工由	区域
铣削角度	0.0000
边界精铣轨迹	所有周围
边界轨迹偏移	优化

图 2-19　刀路轨迹参数

- 【切削方向】：用来定义刀具与工件之间的相对运动方式的参数，共有 5 种方式。从刀具相对工件材料的转动情况来看存在两种运动，即“顺铣”和“逆铣”，如图 2-20 所示。从整个刀轨的全过程来看，允许刀具与工件之间的相对运动在不同刀轨行可以有不同的切削方式，这种一会顺铣一会逆铣的组合就是混合铣，如图 2-20 所示。一般来说顺铣可以达到较好的加工指令，逆铣可以减少刀具磨损，混合铣则可以减少提刀次数，从而提高加工效率。在体积铣开粗时，建议选择“混合铣+顺铣最终路径”方式，即在远离曲面的区域采用混合铣，最后在靠近曲面的刀轨行采用顺铣。



图 2-20　切削方向

- 【垂直步进类型】：在粗加工行切中，垂直步进类型有 3 个选项，分别为“固定”、“可变”和“固定+水平面”。
  - 〖固定〗：每层的切深固定值，产生的刀路除最后一层外，所有层切深相等，如图 2-21 所示。
  - 〖可变〗：在制定的“最大垂直步进”和“最小垂直步进”范围内以最合适的垂直步进进行分层加工，使用这种方式特别适合于有台阶的零件加工，如图 2-21 所示。
  - 〖固定+水平面〗：在固定垂直步进加工层以外，在台阶的水平面上生成一个切削层，如图 2-21 所示。

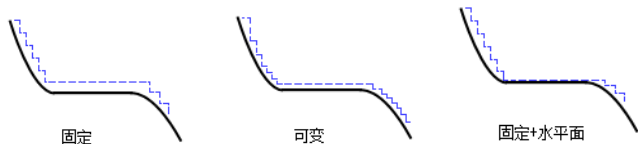


图 2-21　垂直步进类型

- 【侧向步长】：侧向补偿也称为刀间距，决定了相邻刀轨间的距离，如图 2-22 所示。侧向步长设置与刀具类型有关：一般平底刀设置的大小为刀具直径减少 2mm；圆鼻刀设置为刀具直径的 60%～75%，常用 60%。由于球刀的有效切削范围比较少，只有刀尖与工件相接触，所以其侧向步长设置也会比较小，一般根据刀具的大小和加工精度来决定。

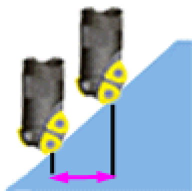


图 2-22　侧向步长



注意

侧向步长从起始边开始计算，最后一行的侧向步长可能相对较小。

- 【加工由】：对于有多个凸台或者凹槽的零件进行等高切削时形成不连续的加工区域，其加工顺序有两种选择：
  - 〖层〗：层优先时，生成的刀路轨迹是将同一高度内的所有内外型加工完以后，再加工下一层，也就是在某一层的所有被加工面加工完以后，再下降到下一层，刀具不会在不同切削区域之间跳来跳去，如图 2-23 所示。
  - 〖区域〗：区域优先时，在加工凸台或者凹槽时，先将这一可以连续加工的形状加工完成，再跳到其他部分，也就是一个区域一个区域地进行加工，将某一连续的区域加工完成后，再交给你个另一个连续的区域，如图 2-23 所示。对于大部分的具有多个型腔的零件，无论轮廓粗铣还是精铣，一般均设定为区域优先，即刀具在加工完一个型腔之后再移动到下一个区域。

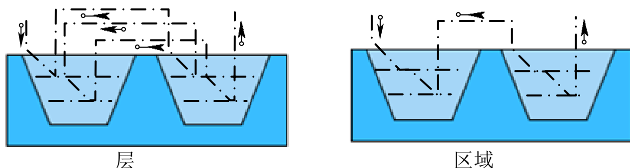


图 2-23　加工由



注意

层优先的特点是，各个凸台或者凹槽最后获得加工尺寸一致，但每一层间的抬刀将消耗一定时间。在精加工中对各个凸台或者凹槽的尺寸一致性要求较高时，应采用层优先，另外在加工多个形状比较细长的凸台时采用层优先加工，可以避免应力不均造成变形。

- 【铣削角度】：设置刀具移动方向。铣削角度是以X轴正方向按逆时针方向计算，如图2-24所示。
- 【边界精铣轨迹】：边界精铣轨迹，设置为在进行平行加工后环绕轮廓周边再切削一圈。在粗加工行切中，该参数默认打开，并且其最终轨迹留量也是按照优化设置的。

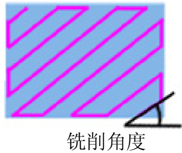


图2-24 铣削角度

6）限制Z值。体积块默认的加工高度范围为工件的总高度，即Z值最大值为工件顶面，而Z值最小值为工件底部。当工件的切削深度较大时或者其他情况需要限制切削深度范围时，可是使用限制Z值定义切削深度范围。限制Z值参数包括“缺省参数”、“仅向上”、“仅底部”、“向上和底部”等，如图2-25所示。

- 【缺省参数】：不限制深度，根据所定义的几何进行加工。
- 【仅向上】：仅限制上部深度，如图2-26所示。此时需要输入“Z值最大值”，它是指开始切削的Z值高度，可以直接输入数值。如果切削起始位置高于所选曲面的最高点，进行粗加工时将从该高度开始切削。

参数	值
⊟ 限制Z值	向上和
Z值最大值	-5.0000
Z-顶部之上检查毛坯	☐
Z值最小值	-66.0000

图2-25 限制Z值

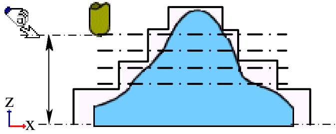


图2-26 仅向上

- 【仅底部】：仅限制底部深度，如图2-27所示。此时需要输入“Z值最小值”，它是指最后切削的Z值高度，可以直接输入数值。如果切削终止位置低于所选曲面的最低点，将加工到曲面加工范围的最低点为止，在该点以下不能生成刀具路径。

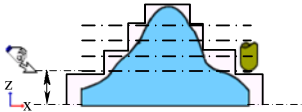


图2-27 仅底部

- 【向上和底部】：同时限制上部和底部深度。



注意

选择“向上”选项时，将显示“Z-顶部之上检查毛坯”选项，用于确定 Z 值最大值之上部位存在毛坯时是否允许刀具进入。选中该复选框，如果认为在 Z 值最大值以上部分有毛坯存在，刀具将不会切削到该部位，以防止刀具过载。

7）层间铣削。体积铣时如果每层切深过大，在坡度比较小的表面留下的余量比较大；而如果每层切深较小，则将使层数增加，加工效率就比较低。层间铣削是在两切削层之间残余比较大的局部区域增加走刀，用以既保持较高的加工效率，同时又能保持残留量较小。

层间铣削参数有“缺省参数”、“基本参数”和“高级参数”等选项。使用“缺省参数”将不进行层间铣削，而基本参数只有侧向步长一个选项，使用高级参数时显示参数表如图 2-28 所示。

参数	值
层间铣削	高级参
层间加工策略	粗加工
体积铣策略	优化
侧向步长	4.0000
垂直步进类型	可变
最大垂直步进	4.0000
最小垂直步进	0.5000
最大2D距离	4.0000
顺序层	底部

图 2-28　层间铣削

高级参数与刀路轨迹参数中对应项基本相同，下面仅介绍不同的选项：

- 【层间加工策略】：用于规定层间加工采用粗加工还是精加工方式。使用粗加工方式将在铣削层中间增加一个类似于粗加工环行铣的切削层，而其毛坯是主层切削后所剩余的；使用精加工方式时则只生成沿侧壁的精加工路径。
- 【顺序层】：用于指定中间层加工时的顺序，包括“向上向下”和“底部”等两个选项，如图 2-29 所示。

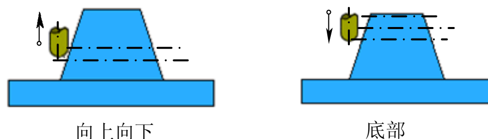


图 2-29　顺序层

8）高速铣。高速加工参数主要用于控制刀轨的圆角连接，使刀具在运动过程中始终保持一种平稳的运动状态，避免因刀轨突然转向使刀具负荷发生急剧变化所带来不利影响（实际加工中常常听到转角处尖锐的刮擦声就是因为没有采用圆角刀轨）。需要注意的是，并非只有高速加工机床才能使用高速加工参数，某些高速加工参数也可以应用于普通加工中心的切削。合理使用高速加工参数，能够极大地提高机床和刀具的寿命。高速铣参数如图 2-30 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
精铣轨迹圆角	☑
首选圆角	0.7000

图 2-30　高速铣参数

- 【快速圆角连接】：对快速运动刀轨进行圆角连接，如图 2-31 所示。

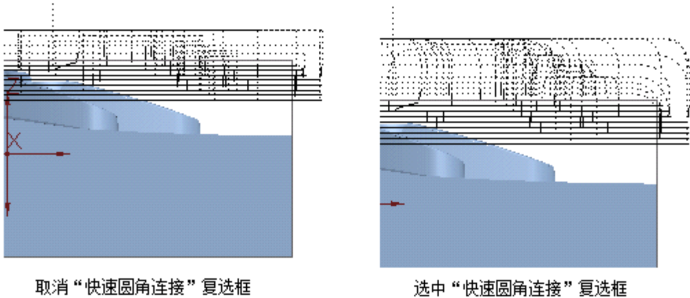


图 2-31　快速圆角连接示意图

- 【精铣轨迹圆角】：对体积块行切加工中最后精铣刀具进行圆角连接，如图 2-32 所示。圆角大小由“首选圆角”值确定。

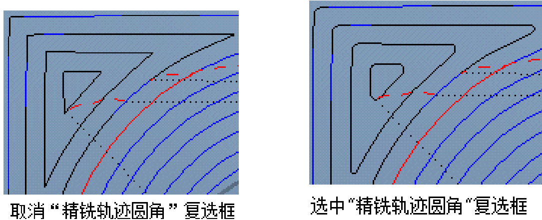


图 2-32　精铣轨迹圆角连接示意图

9）毛坯管理与夹头检查。用于设置识别毛坯和夹头进行干涉检查以及是否更新剩余毛坯等，如图 2-33 所示。

参数	值
毛坯管理与夹头检查	高级参数
Stock Accuracy	高精度
通过夹头限制加工	N/A
最小毛坯宽度	0.0000
更新剩余毛坯	☑

图 2-33　毛坯管理和夹头检查

- 【通过夹头限制加工】：当选择带有夹头的刀具时，可选择 Y 或 N。选择 Y 时，系统在计算过程中会检查夹头与毛坯的干涉情况；选择 N 时，系统在计算过程中会忽略夹头与毛坯的干涉情况，如图 2-34 所示。
- 【最小毛坯宽度】：最小毛坯宽度是为了保证下道工序的加工质量，而在当前工序设定的一个安全值。一般来说最小毛坯宽度=曲面精度+曲面余量+0.25，其中后面一个数 0.25 为保险系数，可以根据不同需要进行调整。在计算当前工序前，系统会根据毛坯或前一工序的结果与零件模型在每一加工层轮廓对应的部位进行比较：如果相差值（水平方向余量）大于所设定的最小毛坯宽度，刀具就会在此加工层加工此部位；否则此部位将被视作不必要的加工部位。如果整个加工层没有部位可以加工，可以跳到下一层进行比较，如图 2-35 所示。

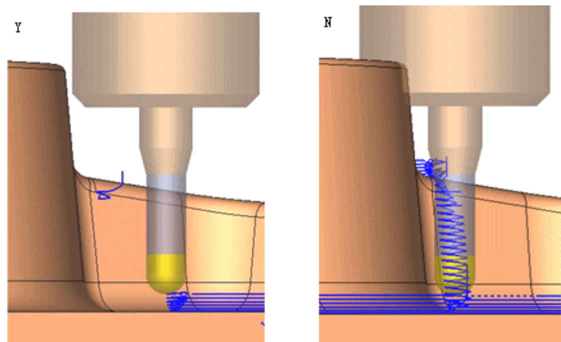


图 2-34　通过夹头限制加工

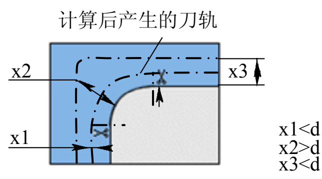


图 2-35　最小毛坯宽度

● 【更新剩余毛坯】: 用于确定是否更新剩余毛坯，以及当前程序对后续程序的毛坯是否影响。选中该选项，则在后面的加工程序中，如果使用参考毛坯选项，则将以更新后的剩余毛坯作为加工对象，即该参数就是毛坯识别。如某一加工程序所使用的刀具因为直径较大，在轮廓内角处留下了较多的余量，而其他部位余量适度，则可以通过更新剩余毛坯，在建立下一程序时，使用更新剩余毛坯选项，就可以以前工序加工后的剩余材料部分作为毛坯，计算出合理的刀路轨迹，清除以前工序留下的过大余量。

10）创建辅助轮廓线。通过创建辅助轮廓线功能可以在刀轨计算后产生一些加工区域的轮廓，这些轮廓可以在另外程序中作为精确边界来定义，从而最大限度地减少刀轨重叠，提高加工效率。所创建的轮廓自动归类刀集合，并可对其进行编辑。创建辅助轮廓线参数如图 2-36 所示。

参数	值
⊟ 创建辅助轮廓线	☑
集合名称	_NC-CONT_
忽略加工区域 (IMA)	☑

图 2-36　创建辅助轮廓线

2. 刀具和卡头

刀具和卡头用于设置刀具和卡头中的参数和更换刀具，其参数如图 2-37 所示。

3. 机床参数

合理机床参数是保证加工效率的有效途径之一，而机床参数的设置则应根据加工不同材料的零件及选择的刀具综合考虑。机床参数主要包括主轴转速和转向、进给速度、刀具直径补偿和切削液控制等。对于某些支持高速加工的加工方式，还有插补方式选择，如图 2-38 所示。

参数	值
刀具和卡头	无名称
底部增量	平刀
直径	10.0000
拐角半径	0.0000
光杆长度	30.0000
切削刃长度	15.0000
总体长度	100.0000
寿命	10.0000
锥度	0.0000
直径补偿	1
长度补偿	1
卡头补偿	1
刀片数量	2
卡头号	1
夹头	☐
刀具注释	无备注

图 2-37　刀具和卡头参数

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	30.0000
主轴转速	1000
进给(毫米/分钟)	350.0000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 2-38　机床参数



注意

机床参数的默认值可以在刀具建立时设定，如果在同一文件中使用同一刀具建立过同一刀轨的刀具路径，那么默认参数将是最后使用的参数。

- 【Vc】和【主轴转速】：主轴转速的设置有两种方法，一种是在主轴转速中直接输入数值，另外是输入刀具切削速度 V_c，由系统进行计算得到主轴转速。
- 【进给（毫米/分钟）】：用于设置刀具每分钟在 X、Y 方向切削时的进给速度。通常在刀具承受能力范围之内，可以用相对高的转速和相对较快的进给进行加工，虽然这样造成刀具的寿命缩短，但加工效率提高所产生的效益会远远大于刀具的损耗。
- 【进刀速率（%）】：通过正常进给速率乘以一个系数（百分比）获得，用于控制刀具相对缓慢地接近产生零件形状的部位。这个系数通常为 30%，如图 2-39 所示。设置进刀速率主要考虑零件避免抢刀过切等现象的发生。
- 【切入进给速率（%）】：刀具接触被加工零件时的主轴转速，如图 2-40 所示。由于刀具在接触零件时产生的瞬时作用力较大，为避免刀具碰撞断刀，应设置较小的切入进给速率。为此可根据工件材料和刀具性能来定：如果工件材料比较容易加工，一般设置为 60%；如果工件材料比较硬，刀具比较差，则这个比率可以设置得小一点，比如 30%。
- 【自适配进给控制】：使用自适配进给控制可以在给定进给量变化范围内，由程序自行加减速。程序在运算时根据切削负荷和切削条件的变化，会自动进行进给速度的增加和减少。其中“减少到”参数用于设置刀轨转弯开始点处的速率；“增加到”参数用于设置刀轨转弯结束点处的速率，如图 2-41 所示。

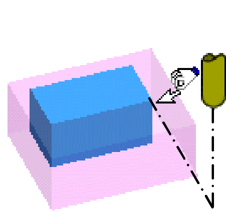


图 2-39　进刀速率

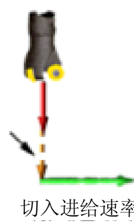


图 2-40　切入进给速率

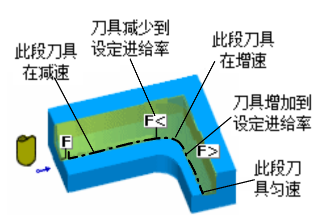


图 2-41　自适配进给控制

- 【空走刀连接】：用于设置快速移动时进给速度，包括以下两个选项：
  - 〖快速移动〗：包括在安全平面移动以及刀具提刀移动、刀具路径切削区域转换；下刀接近加工表面时所进行的运动的进给速度为机床的最大进给速度，如图 2-42 所示。
  - 〖最大进给速度〗：激活"空切进给"选项，用户可输入所需的空走刀进给速度，如图 2-42 所示。

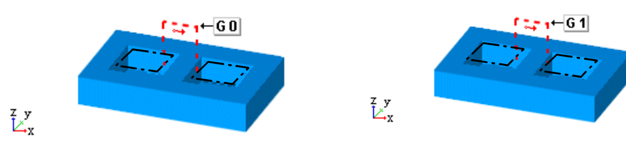


图 2-42　空走刀连接

- 【冷却】：针对不同的刀具以及加工材料，可以选择不同的切削液介质。通常对模具加工等单件加工的程序，应设置为切削液关闭，由机床操作人员按照实际需要在机床的控制面板上直接控制，这样便于在加工程序中对最危险的起始部分进行观察，同时可以确保机床整洁。对于使用加工中心批量加工的程序来说，由于不需要做太多的人工干预，可以设置自动开启切削液。

4. 零件

零件参数包括边界、零件曲面等，如图 2-43 所示。边界主要用于限制加工范围，在定义边界可选时，是否定义边界可由用户决定；当边界定义为比选项时，则必须定义边界，边界一定是封闭的。当加工对象为曲线时，此曲线称为轮廓，轮廓可以是开放的也可以是封闭的。零件曲面就是所说的加工对象，某些情况下可以定义多组零件曲面，各组曲面可以单独设置曲面余量。

参数	值
⊞ 机床参数	
⊟ 零件	
边界（可选）	1
零件曲面组数量	1
零件曲面	15

图 2-43　零件参数

- 【边界】：边界作用是限制加工范围，在曲面上生成刀具路径时将被选择的轮廓向上向下无限延伸形成的区域所修剪。在轮廓限定范围内的刀具路径将被保留，而在轮廓限制范围之

外的刀具路径将不再保留。

- 【零件曲面】：零件曲面是体积铣加工中必须定义的，可以选择多个曲面作为零件曲面。选中的曲面将改变颜色，完成选择后单击鼠标中键离开，在加工对象参数表中将显示当前选择曲面的总数量。

操作练习 1：体积铣粗行切实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”；单击“确定”按钮进入编程界面。

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“exercise01.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise1\uncompleted\exercise01.elt”）文件；单击“选择”按钮，选择“使用参考的模型 Model 坐标”选项，然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 2-44 所示。

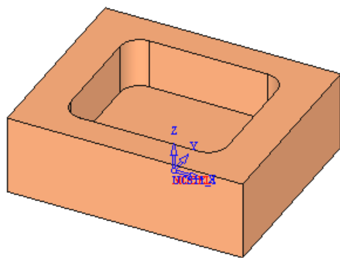


图 2-44　调入模型

3）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BN10”刀具，如图 2-45 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



图 2-45　“刀具库”对话框

4）创建刀路轨迹。单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“3 轴”，安全平面 Z 为“50”；如图 2-46 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。



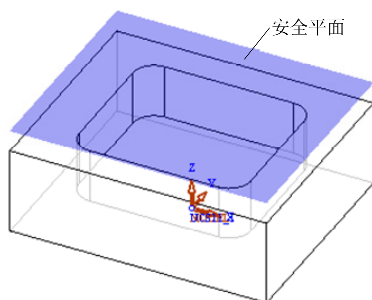
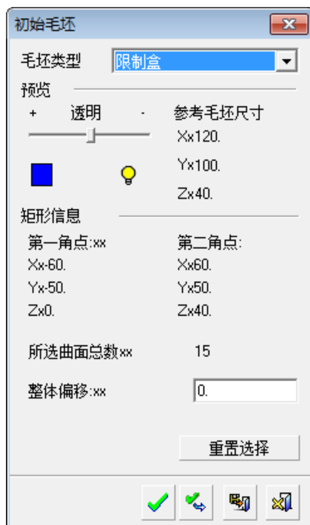


图 2-46 “创建刀路轨迹”对话框

5）创建毛坯。单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“限制盒”，如图 2-47 所示；单击确定按钮，完成毛坯的创建。



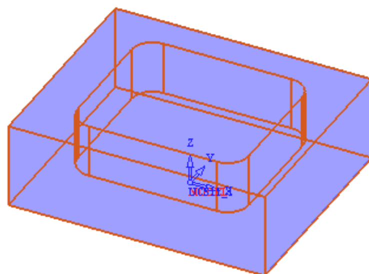


图 2-47 创建毛坯

6）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC

Process Manager”对话框，“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗行切”，如图 2-48 所示。

7）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“15”，如图 2-49 所示。

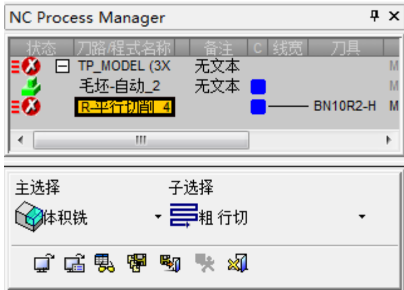


图 2-48 “NC Process Manager”对话框

参数	值
⊞ 刀路参数	
⊞ 刀具和卡头	BN10R2-H
⊞ 机床参数	
⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	15

图 2-49 “零件”选项

8）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“30.0000”；展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.5000”，“曲面精度”为“0.0500”，其他参数如图 2-50 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“刀路轨迹”，设置“进刀角度”为“30.0000”，“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“0.5000”，其他参数如图 2-50 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣+顺铣”，“固定垂直步进”为“0.1500”，“侧向步长”为“0.6000”，“加工由”为“区域”，其他参数如图 2-50 所示。

参数	值
⊟ 进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	30.0000
最小切削宽度	0.1000
最大螺旋半径	4.8000
螺纹铣	40.0000
外部进刀毛坯限制	☑
⊞ 边界设置	
⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.5000
曲面精度	0.0500
微铣削最大轮廓间	0.0100

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
切削方向	混合铣 + 顺铣
垂直步进类型	固定 + 水平
固定垂直步进	0.1500
侧向步长	0.6000
从安全平面到固定层	☐
加工由	区域
切换起始边	反向
铣削角度	0.0000
边界精铣轨迹	所有周围
边界轨迹偏移	优化

图 2-50 进刀和退刀点参数

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”、“精铣轨迹圆角”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 2-51 所示。

9）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 2-52 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
精铣轨迹圆角	☑
首选圆角	0.7000
角部圆角连接	☑

图 2-51　高速铣

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	747.2278
主轴转速	23785
进给(毫米/分钟)	8115.0000
进刀速率（%）	500
切入进给速率(%)	100
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-52　设置机床参数

10）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-53 所示。

2.1.1.2　体积铣-粗环切加工

粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削。使用粗加工环切可以选择不同的加工策略，生成的刀路轨迹在同一层内可以不抬刀，并且可以将轮廓及岛屿边缘加工到位，如图 2-54 所示。

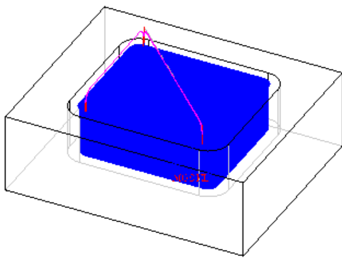


图 2-53　生成的刀具路径

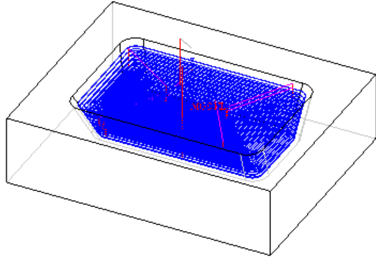


图 2-54　粗环切示例

体积铣粗环切的“NC Process Manager”对话框，包括“刀路参数”、“刀具和卡头”、“机床参数”和“零件”等 4 个部分。粗行切与粗环切加工参数基本相同，其主要差别在于刀路参数，如图 2-55 所示。

参数	值
刀路参数	
安全平面	
进刀和退刀点	优化
边界设置	
精度和曲面偏移	基本参数
电极加工	☐
刀路轨迹	
限制Z值	缺省参数
层间铣削	基本参数
高速铣	缺省参数
清理行间间隙	基本参数
毛坯管理与夹头检查	缺省参数
创建辅助轮廓线	☐

图 2-55　刀路参数

1．刀路轨迹

刀路轨迹的参数相对较多，而且不同加工方式，甚至于不同的加工对象选择、不同的上级参

数设置都会引起参数表显示的局部变化。粗环切刀路轨迹参数如图 2-56 所示。

- 【策略】: 刀具策略参数是环切的特有参数，包括“优化”和“用户定义”。
  - 〖优化〗: 将环绕策略进行自动优化，用户可以少设置一些参数（实际是“用户定义”的默认策略），如图 2-57 所示。在默认情况下，3 个子策略全部被激活，系统会根据被加工零件的形状决定走刀策略。
  - 〖用户定义〗: 由用户定义是否采用毛坯环切走刀（毛坯环切走刀对完全开放的零件加工来说比较合适，半开放或全封闭零件没有必要采用毛坯环绕走刀策略）或在限制条件下进行毛坯环绕走刀，如图 2-57 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	顺铣
策略	优化
垂直步进类型	固定 + 水
固定垂直步进	4.0000
侧向步长	4.0000
真环切	☐
从安全平面到固定层	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留余量	0.4000

图 2-56 刀路轨迹参数

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	顺铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☑
限制毛坯环切行数	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑

图 2-57 策略优化时的选项



注意

在高速加工中对于周边余量不大的零件，如果使用优化策略，将使用毛坯环切方式，可能产生较多的抬刀路径，所以应该使用“用户定义”策略，并取消“毛坯环切”复选框。

- 【真环切】: 普通环切在偏移刀轨之间是 S 形连接，如图 2-58 所示。真环切则是将所有偏移刀轨之间的连接取消（最后刀轨和次最后刀轨是原始刀轨，不能取消连接，这是为了保证最后加工质量），形成一个没有任何连接的真正环切刀轨，如图 2-58 所示。真环切可以节省时间，如有可能，尽量采用。

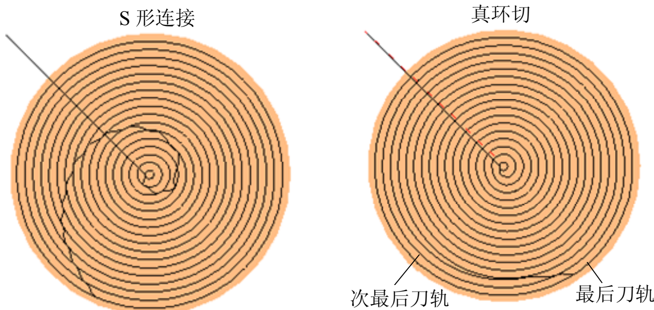


图 2-58 真环切

● 【半精轨迹】：半精加工轨迹用于在精铣轮廓周边之前再增加一行环绕曲面轮廓的刀具路径。选中该复选框，将需要输入“为半精轨迹留余量”值。

2. **高速铣**

高速铣参数用于设置一些适合于高速加工要求的选项，主要是避免在高速状态下进行急转弯。粗环切高速铣参数如图 2-59 所示。

● 【摆线】：使用摆线方式进入加工时，进入全刀切削部位时使用摆线方式逐渐切入，其实际切削的行距变得较小，如图 2-60 所示。选中“摆线”复选框，需要输入“摆线步距”和“预设置的摆线半径”，如图 2-61 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	8.2000
预设置的摆线半径	3.0000
多层 Z	☐
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.7000

图 2-59　粗环切高速铣参数

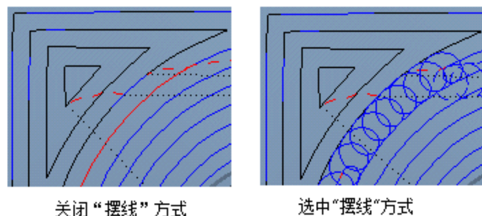


图 2-60　摆线方式

● 【多层 Z】：在粗加工时，为保持刀具负荷均匀，将切削层自动分为多层进行加工（如果与摆线功能同时开启，则摆线运动优先），如图 2-62 所示。

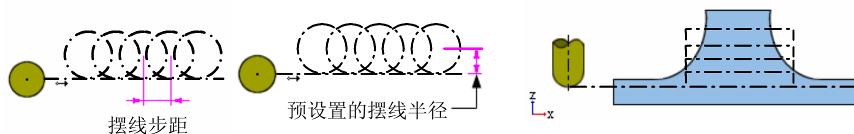


图 2-61　摆线参数　　图 2-62　多层 Z

● 【快速圆角连接】：对快速运动刀轨进行圆角连接，如图 2-63 所示。

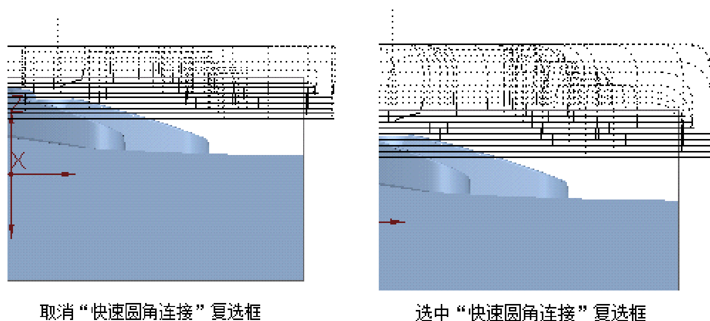


图 2-63　快速圆角连接示意图

- 【角部圆角连接】：角部圆角连接可以避免在加工角落部位产生突变的切削进给方向，从而保持刀具运动轨迹的光滑与平稳，避免刀具切削方向的突然变化，如图 2-64 所示。选中该复选框，需要设置“首选圆角”参数。

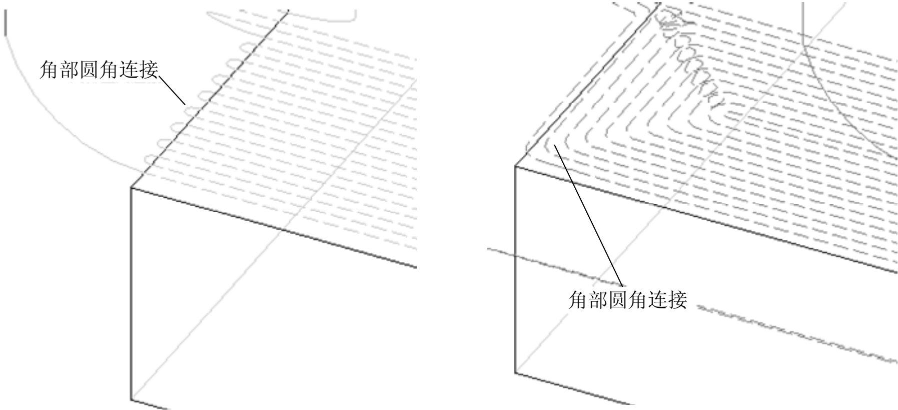


图 2-64 角部圆角连接示意图

3. 清理行间间隙

在环绕开粗过程中，由于曲面形状、轮廓形状以及刀间距大小的综合影响，导致在刀轨转角以及三角地带可能出现未切削区域，通过设置“清理行间间隙”，可以有效地清除这些未切削区域。Cimatron E9.0 将残料按所产生区域的不同分成两种：一种是刀轨转角地带所产生的残料为筋；另一种是刀轨三角地带所产生的残料称为 CBP，清理前者只延伸原先转角处刀轨即可，而清理后者需要另外追加刀轨行。“清理行间间隙”的“参数”如图 2-65 所示。

参数	值
清理行间间隙	高级参
行间间隙策略	CBP &Ridge
圆角延伸	2.0000
有效范围半径	2.8000
最狭窄区域宽度	0.8000

图 2-65 清理行间间隙的参数

- 【行间间隙策略】：应用于设置行间间隙策略，包括“CBP&Ridge”、“只筋”和“只使用 CBP”等 3 个选项，如图 2-66 所示。

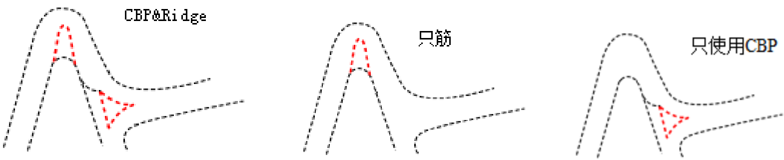


图 2-66 行间间隙策略

- 【圆角延伸】：用于清除筋时设置延伸刀轨后的圆角半径。

● 【有效范围半径】：针对侦侧行间残料的大小区域，该值设置得越小，侦侧刀的未加工区域就越大，如图 2-67 所示。

● 【最狭窄区域宽度】：表示允许残留的未加工区域宽度，设置的目的是避免为了清除很小的残料而浪费时间，如图 2-68 所示。对于不大的工件设置为 0；大工件可适当设置一个数 0.3，可以有效节省一点时间；如果是高速加工也应该设置为 0，否则可能影响下一层的刀具受力。

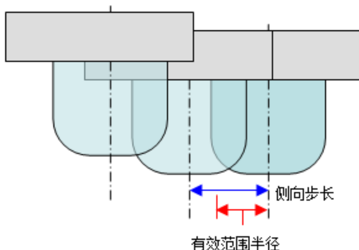


图 2-67　有效范围半径

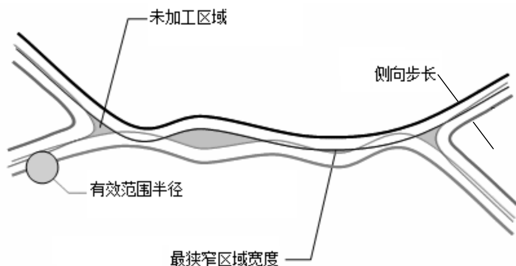


图 2-68　最狭窄区域宽度

操作练习 2：体积铣粗环切实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”；单击“确定”按钮进入编程界面。

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“exercise02.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise2\uncompleted\exercise02.elt”）文件，单击“选择”按钮，选择“使用参考的模型 Model 坐标”选项，然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 2-69 所示。

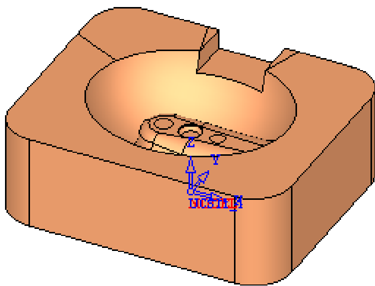


图 2-69　调入模型

3）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击“刀具库”按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BN10”刀具，如图 2-70 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

4）创建刀路轨迹。单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“3 轴”，安全平面 Z 为“90”；如图 2-71 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

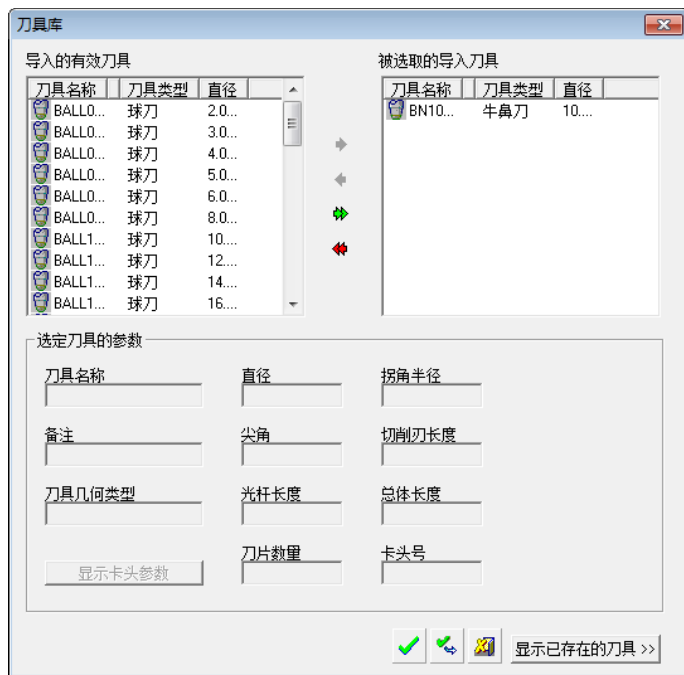


图 2-70 “刀具库”对话框

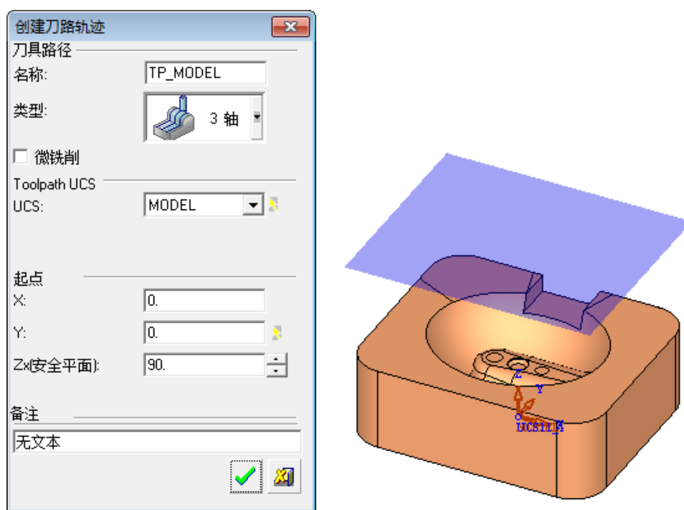
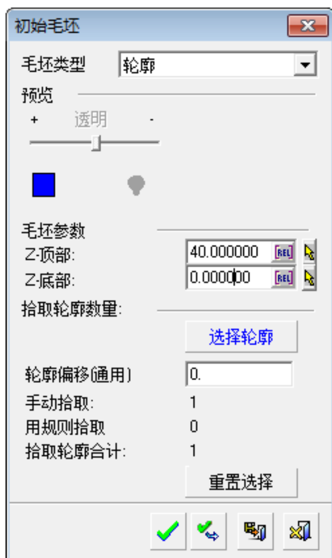


图 2-71 “创建刀路轨迹”对话框

5）创建毛坯。单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 2-72 所示的模型边线，单击鼠标中键返回；单

击确定按钮✓，完成毛坯的创建。



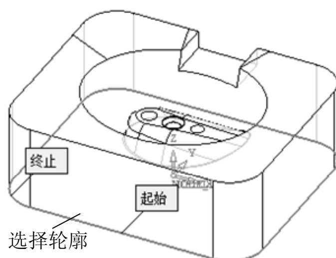


图 2-72　创建毛坯

6）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 2-73 所示。

7）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框；在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“45”，如图 2-74 所示。

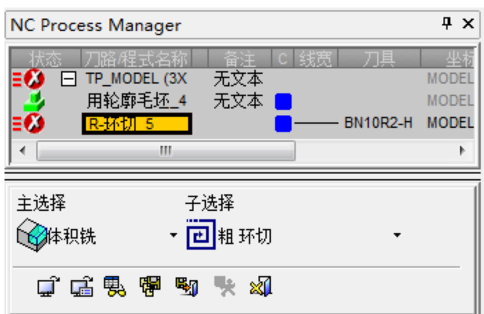


图 2-73　“NC Process Manager”对话框

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	45

图 2-74　“零件”选项

8）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“进刀和退刀点”中，设置“进刀角度”为“30.0000”；展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.5000”，“曲面精度”为“0.0500”；其他参数如图 2-75 所示。

- 展开“刀路参数”选项中“刀路轨迹”，展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣+顺铣”，“固定垂直步进”为“0.1500”，“侧向步长”为“0.6000”，“加工由”为“区域”；其他参数如图 2-75 所示。

参数	值
进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	30.0000
最小切削宽度	0.1000
最大螺旋半径	4.8000
螺纹铣	40.0000
外部进刀毛坯限制	☑
边界设置	
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.5000
曲面精度	0.0500
微铣削最大轮廓间	0.0100

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣 + 顺铣
策略	优化
垂直步进类型	固定 + 水平面
固定垂直步进	0.1500
侧向步长	0.6000
真环切	☑
从安全平面到固定	☐
加工由	区域
半精轨迹	从不

图 2-75　进刀和退刀点参数

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 2-76 所示。

9）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框；其他相关参数设置如图 2-77 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	0.6000
预设置的摆线半径	3.0000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.7000

图 2-76　高速铣

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	747.2278
主轴转速	23785
进给(毫米/分钟)	8115.0000
进刀速率（%）	500
切入进给速率(%)	100
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-77　设置机床参数

10）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-78 所示。

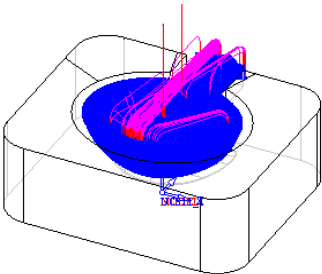


图 2-78　生成的刀具路径

2.1.1.3　体积铣—二次开粗

二次开粗加工用于加工前次加工所残留的材料，就加工方式和加工策略来说完全等同于环绕开粗。两者最大区别在于二次开粗没有层间加工。二次加工主要利用毛坯识别功能，对上一程序遗留较多且不均匀的残料进行再次铣削，以达到与用户设置余量更接近的开粗效果，为后续的精加工做好准备。



由于 Cimatron E9.0 大多数程序都具有毛坯识别技术，因此粗环切和二次开粗可以等价使用，即粗环切同样可以作为二次开粗使用。

2.1.2　曲面铣

曲面铣是一种精加工方式，它生成的刀具路径仅在加工零件曲面，通过对曲面精确余量和精细公差的控制，可以尽可能达到所设计曲面的结果。在 Cimatron E9.0 中曲面铣包括多个子类型，如图 2-79 所示：第一组是 Cimatron E9.0 曲面铣功能，包括 5 种曲面铣方法：精铣全部、限制角度精铣、精铣水平区域、开放轮廓、封闭轮廓；第二组是传统加工方法，是从 Cimatron it 继承下来的加工方法。本节仅介绍 Cimatron E9.0 曲面铣功能。

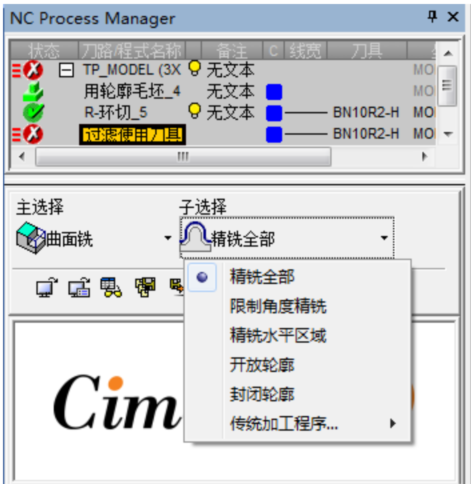


图 2-79　曲面铣加工类型

2.1.2.1　曲面铣—精铣全部

精铣全部是最常用的曲面精加工与半精加工程序。通过设置不同的走刀方式，它可以适合于各种曲面零件加工，如图 2-80 所示。作为精铣全部的曲面对象一般要具备的特点是：范围内所有曲面大致是平坦的或陡峭的。

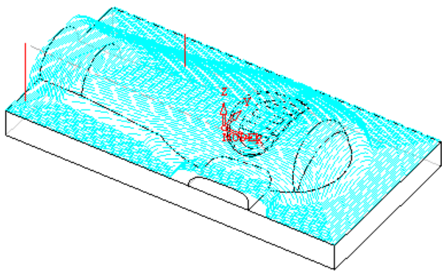


图 2-80　精铣全部示例

精铣全部“NC Process Manager”对话框包括“刀路参数”、“刀具和卡头”、“机床参数”和“零件”等 4 个部分。相当一部分参数与体积铣相同。下面仅对曲面铣特有的参数作详细介绍。

1. **刀路轨迹**

精铣全部刀路轨迹参数如图 2-81 所示。

加工方式包括环切、平行切削、层、变量层和 3D 步距等 5 个选项。选择不同的加工方式，后续的加工参数将有较大变化。

- 【环切】：环切方式生成轮廓限定范围内的环绕方式进行铣削的曲面加工

刀具路径，此时刀路轨迹参数如图 2-82 所示。

➢ 〖水平区域切削方向〗：该参数包括“顺铣”和“逆铣”两个选项，通常情况下都使用顺铣加工。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	平行切削
水平加工顺序	通过最近
水平区域切削方向	逆铣
水平步距	0.3000
铣削角度	45.0000
边界精铣轨迹	所有周围
边界轨迹偏移	优化

图 2-81　刀路轨迹参数

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由外向内
水平步距	0.3000
真环切	☑

图 2-82　环切刀路轨迹


注意

顺铣加工优点是切削力小、机床振动小，加工出来的零件比较光滑，一般用于精加工；逆铣加工优点是加工余量大，但加工出来的工件比较粗糙，一般用于粗加工。

➢ 〖水平区域刀具方向〗：该参数包括“由外向内”和“由内向外”两个选项，如图 2-83 所示。

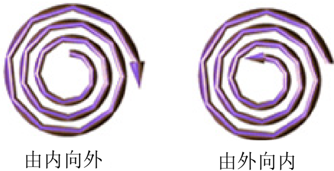


图 2-83　水平区域刀具方向

➢ 〖水平步距〗：指切削行之间在 XY 平面上的投影距离。

➢ 〖真环切〗：普通环切在偏移刀轨之间是 S 形连接，如图 2-84 所示。真环切则是将所有偏移刀轨之间的连接取消（最后刀轨和次最后刀轨是原始刀轨，不能取消连接，这是为了保证最后加工质量），形成一个没有任何连接的真正环切刀轨，如图 2-84 所示。真环切可以节省时间，如有可能，尽量采用。

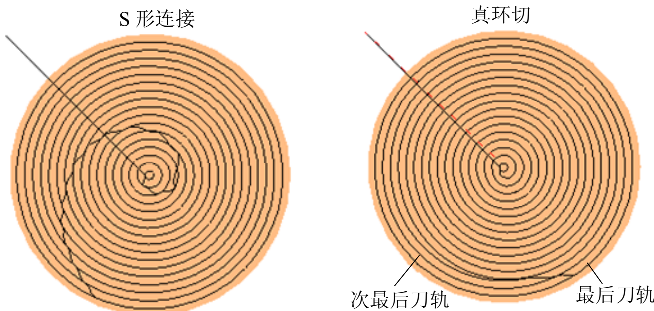


图 2-84　真环切

● 【平行切削】：平行切削生成相互平行的刀具路径，它与体积铣的平行切削方式类似，只是在体积铣中刀具路径是在一层中分布，而在曲面铣中刀具路径是投影在零件表面上。平行切削加工获得的刀痕一致，整体美观，适用于大部分的曲面比较平缓且过渡平滑的曲面。平行切削刀路轨迹参数如图 2-85 所示。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	平行切
水平加工顺序	通过最近
水平区域切削方向	顺铣
水平步距	0.3000
铣削角度	45.0000
边界精铣轨迹	所有周围
边界轨迹偏移	优化

图 2-85　平行切削刀路轨迹参数

➢ 〖水平加工顺序〗：用于控制在加工过程中遇到障碍物时（比如高度限制时）的加工顺序问题，包括“通过最近”和“根据路径”两个选项。当选择“通过最近时”，刀具在行进方向遇到障碍物，就优先加工无需提刀的区域，加工完最近的区域后再提刀进入下一个区域进行加工；当选择“根据路径”时，刀具在行进方向遇到障碍物，就提刀通过，再沿着原来方向继续进行。

➢ 〖水平区域切削方向〗：包括“顺铣”、“逆铣”和“混合铣”3 个选项。使用顺铣或者逆铣时产生单向的切削路径，通常可使用混合铣方式进行双向切削，可以提高效率。

➢ 〖铣削角度〗：用于设置刀具轨迹的加工角度，即刀具路径与 X 轴正方向所形成的角度，角度范围为 0°～360°。

➢ 〖边界精铣轨迹〗：曲面精加工一般情况下不需要进行边界精铣。

● 【层】：层切方式生成等高加工的刀路轨迹。它与传统加工中的根据层方式相类似，适合于曲面比较陡峭的零件加工。层切方式刀路轨迹参数如图 2-86 所示。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	层
垂直区域切削方向	顺铣
垂直步进	0.3000
加工由	层
短连接越过尖锐边	从不
长连接越过平坦边	☑
长连接移位	0.1000

图 2-86　层切方式刀路轨迹参数

➢ 〖垂直区域切削方向〗：用于设置垂直区域的铣削方式，包括“顺铣”、“逆铣”和“混合铣”3 种方式。对于垂直区域的混合铣在零件存在开放轮廓时可以进行双向加工，对于没有开放部位的零件通常情况下使用顺铣加工。

➢ 〖垂直步进〗：用于设置刀轨在垂直方向上的步进量，此时主要考虑加工后残余高度。

➢ 〖加工由〗：包括“层”和“区域”两个选项。对于存在多个加工区域时，一般选择区域方式；而对于多个加工区域的一致性要求很高时，使用层方式，可以保证每一个区域的加工质量保持一致。

- 【变量层】：变量层方式生成不等切深的等高加工刀路轨迹。它与层方式的区别在于每一层的切深不固定，而是依据最大粗糙度值来确定。变量层刀路轨迹参数如图 2-87 所示。
  - ➢〖垂直区域最大粗糙度〗：设定最大残余高度，从而由系统来决定每层的垂直步进，如图 2-88 所示。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	变量层
垂直区域切削方向	顺铣
垂直区域最大粗糙度	0.2000
最大切深	0.3000
加工由	区域
短连接越过尖锐边	从不
长连接越过平坦边	☑
长连接移位	0.1000

图 2-87 变量层刀路轨迹参数

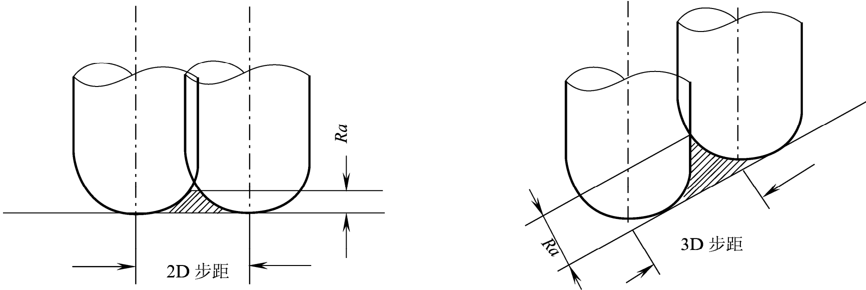


图 2-88 粗糙度示意图

  - ➢〖最大切深〗：指定最大的层切深度。
- 【3D 步距】：3D 步距与环切方式相似，但生成在曲面的 3D 方向的等步距；而环切生成在水平面等距刀轨。曲面斜度变化较大时，使用 3D 步距方式可以在零件加工表面获得较好的加工质量。3D 步距刀路轨迹参数如图 2-89 所示。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	3D步距
3D 切削方式	顺铣
3D 切削方向	由外向内
3D步距	0.05*tldi

图 2-89 3D 步距刀路轨迹参数

2. 层间边接

当选择“层”或“变量层”方式时可设置“层间边接”选项，如图 2-90 所示。

参数	值
层间边接	高级参数
连接方法	沿面加工
偏移距离（面上）	1.5000
重叠距离	0.0000
首选逼近半径	观看"进入
优化退刀半径	观看"进入

图 2-90 层间边接参数

- 【连接方法】：包括“沿面加工”和“切向”两个选项，选项参数的含义如下：
  - ➢〖沿面加工〗：刀具从当前层运动到下一层时，其间始终接触曲面，即沿着曲面进入下一层，如图 2-91 所示。
  - ➢〖切向〗：刀具从当前层运动刀下一层时，其间采用切向进退，即生

成一段圆弧再进刀到下一层，如图 2-92 所示。

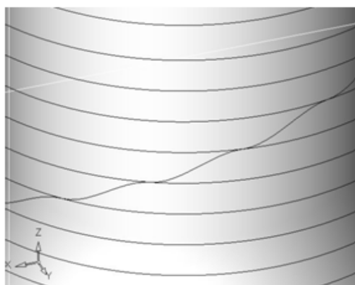


图 2-91　沿面加工

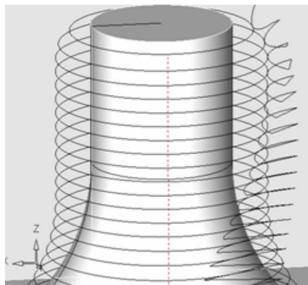


图 2-92　切向

- 【偏移距离（面上）或移动距离（切线）】：从当前层开始点与上层结束点之间的沿面偏移距离或切线距离，如图 2-93 所示。
- 【重叠距离】：同一层开始点和结束点不在同一点，刀具在完成同层整个常规切削刀轨后错位一个距离才算结束，如图 2-93 所示。

3．高速铣

精铣全部中选择“变量层”时的高速加工参数如图 2-94 所示。

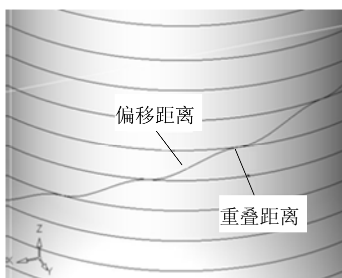
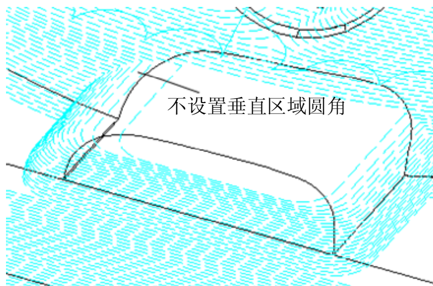


图 2-93　偏移距离和重叠距离

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
垂直区域圆角	☑
垂直区域首选圆角	0.5000

图 2-94　高速铣参数

- 【垂直区域圆角】：在垂直区域增加圆角，主要体现在内圆角部位，如图 2-95 所示。垂直区域圆角半径的大小，由“垂直区域首选圆角”参数确定。



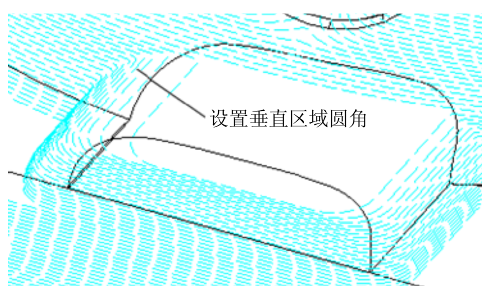


图 2-95　垂直区域圆角

4．零件

零件参数包括边界、零件曲面和检查曲面等，如图 2-96 所示。

参数	值
⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	25
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 2-96　零件参数

- 【边界】：边界作用是限制加工范围，在曲面上生成的刀具路径，将被选择的轮廓向上向下无限延伸形成的区域所修剪：在轮廓限定范围内的刀具路径将被保留，而在轮廓限制范围之外的刀具路径将不再保留。
- 【零件曲面】：零件曲面可以选择多个曲面作为零件曲面。选中的曲面将改变颜色，完成选择后，单击鼠标中键离开，在加工对象参数表中将显示当前选择曲面的总数量。
- 【检查曲面】：检查曲面用于干涉面，即在加工零件曲面生成的刀具路径，如遇到检查曲面则要避让。检查曲面可用于保护一些本加工程序不加工的零件表面。

操作练习 3：曲面铣精铣全部实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框；选择“exercise03nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise3\uncompleted\exercise03nc.elt”）文件，单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-97 所示。

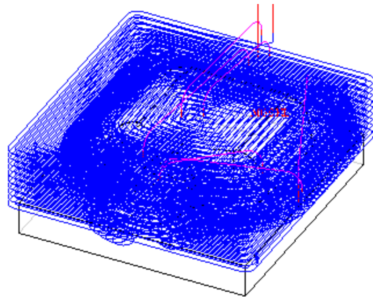


图 2-97　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BALL06-H”刀具，如图 2-98 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 2-99 所示。

4）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键，完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“43”，如图 2-100 所示。



图 2-98　“刀具库”对话框

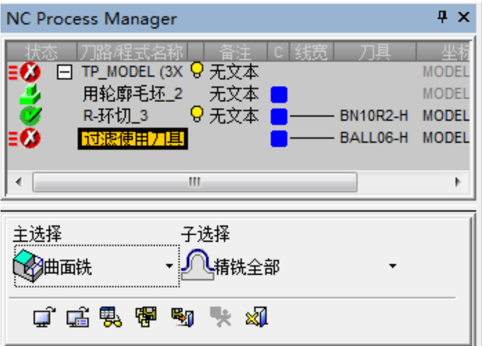


图 2-99　“NC Process Manager”对话框

⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	43
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 2-100　“零件”选项

5）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“0.0000”；其他参数如图 2-101 所示。

参数	值
⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-101　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“加工方式”为“环切”，“水平区域切削方向”为“顺铣”，“水平步距”为“0.3000”，选中“真环切”复选框；其他参数如图 2-102 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 2-103 所示。

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由内向外
水平步距	0.3000
真环切	☑

图 2-102　进刀和退刀点参数

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000

图 2-103　高速铣

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，设置其他相关参数如图 2-104 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-105 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	847.4760
主轴转速	44960
进给(毫米/分钟)	9805.0000
进刀速率（%）	100
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-104　设置机床参数

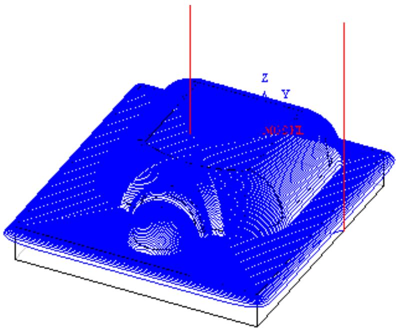


图 2-105　生成的刀具路径

2.1.2.2　曲面铣—限制角度精铣加工

限制角度精铣将选择曲面加工部位进行陡峭检查，区分为水平区域和垂直区域，并对不同性质的区域采用不同的加工技术，如图 2-106 所示。小于限制角度的曲面区域被系统识别为水平区域，针对平坦区域可采用平行、环切、3D 步距等加工技术；大于限制角度的曲面区域被识别为垂直区域，针对垂直区域可采用层铣、

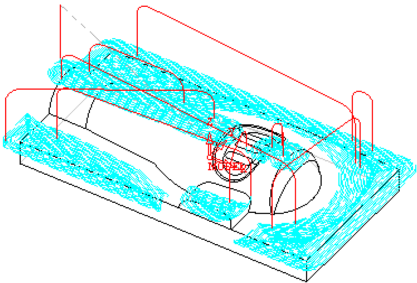


图 2-106　限制角度精铣示例

变量层、插铣等加工技术。

下面对曲面铣—限制角度精铣加工尚未介绍的参数加以说明。

1．刀路轨迹

限制角度精铣刀路轨迹参数如图2-107所示。

参数	值
刀路轨迹	
水平区域	☑
水平加工方法	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由外向内
水平步距	0.6000
真环切	☐
垂直区域	☑
垂直加工策略	层
垂直区域切削方向	顺铣
垂直步进	0.6000
通用加工顺序	垂直优先
加工由	区域
限制角度	5.0000

图 2-107　刀路轨迹参数

- 【水平区域】：在根据角度精铣中选中“水平区域”复选框可进行水平区域加工，此时可设置的水平加工方法有：环切、平行铣削、3D 步距，如图 2-108 所示。

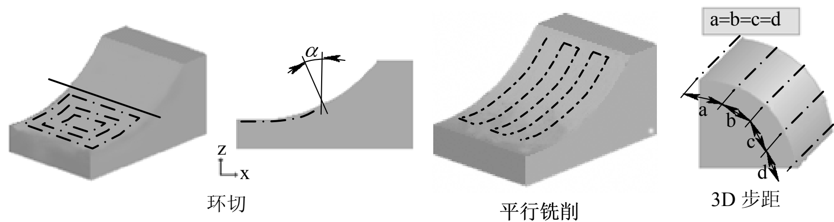


图 2-108　水平加工方式



注意

使用环切或者平行切削方式时，其刀路参数与精铣所有曲面铣中选择环切或平行切削方式时的参数完全一样，其差别仅仅在于加工区域只有在曲面的斜度小于限制角度的区域。3D 步距与环切方式相似，但生成的曲面 3D 方向等步距的刀路轨迹，而环切生成水平面上等步距刀轨。所以如果曲面的斜度变化较大时，使用 3D 步距方式可以在零件加工表面获得很好的加工质量。3D 步距可以认为是高速铣精加工的最佳策略。

- 【垂直区域】：在根据角度精铣中选中“垂直区域”复选框可进行垂直区域加工，此时可设置的垂直加工方法有：层、向下插铣、向上插铣、双向插铣和变量层，如图 2-109 所示。

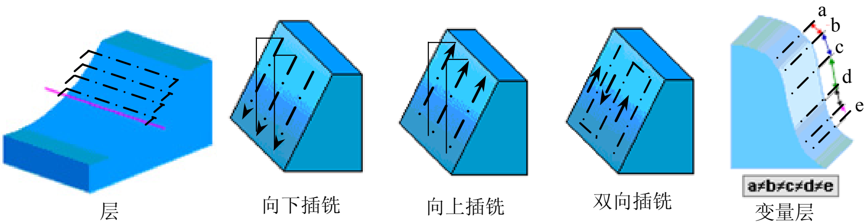


图 2-109　垂直加工方式

- 【通用加工顺序】：在同时打开水平区域和垂直区域时，会有加工顺序选项：可以选择垂直区域优先和水平区域优先，如图 2-110 所示。

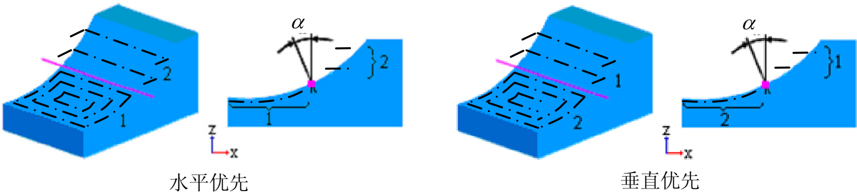


图 2-110　通用加工顺序

- 【限制角度】：在限制角度精铣加工中，必须有一个可以将所有加工对象识别为水平区域和垂直区域的判断标准。这个判断标准就是斜率限制角度。斜率限制角度是指曲面上某点处法向线与 Z 轴的夹角。曲面上的斜率角度小于限制角度的区域，被系统自动识别为水平区域，否则为垂直区域，如图 2-111 所示。

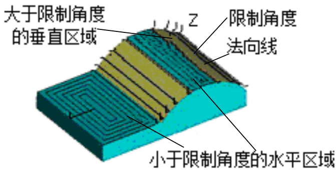


图 2-111　限制角度

2. **高速铣**

限制角度精铣的高速加工参数如图 2-112 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
水平区域圆角	☑
水平区域首选圆角	0.8000
垂直区域圆角	☑
垂直区域首选圆角	0.8000

图 2-112　高速铣参数

- 【水平区域圆角】：在水平区域增加圆角如图 2-113 所示。圆角尺寸由“水平区域首选圆角”参数指定。

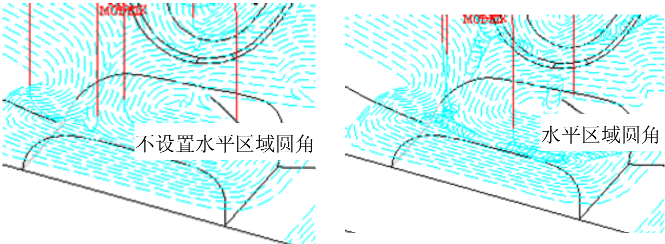


图 2-113　水平区域圆角

- 【垂直区域圆角】：在垂直区域增加圆角，主要体现在内圆角部位，如图 2-114 所示。圆角尺寸由“垂直区域首选圆角”参数指定。

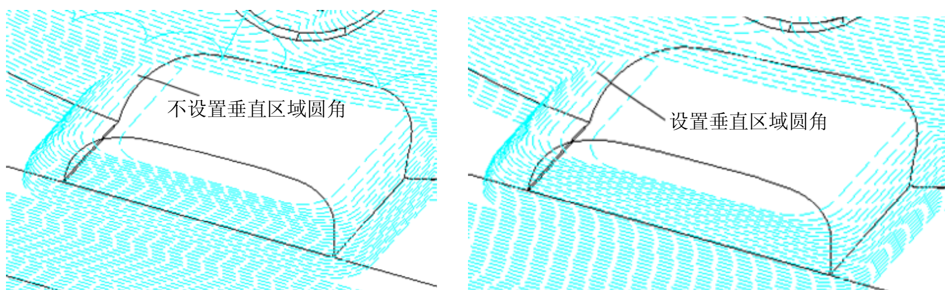


图 2-114　垂直区域圆角

操作练习 4：曲面铣限制角度实例演练

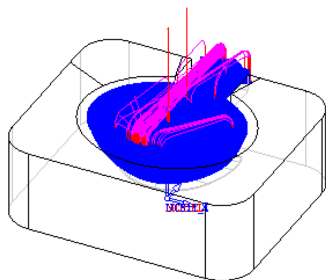


图 2-115　文件调入

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框；选择“exercise04nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise04\uncompleted\exercise04nc.elt”）文件，单击 Load 按钮✔，完成文件调入，如图 2-115 所示。

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框；选择“BALL06-H”刀具，如图 2-116 所示。依次单击确定按钮✔，完成刀具创建。



图 2-116　“刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“限制角度精铣”，如图 2-117 所示。

4）选择加工曲面，具体步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“45”，如图 2-118 所示。

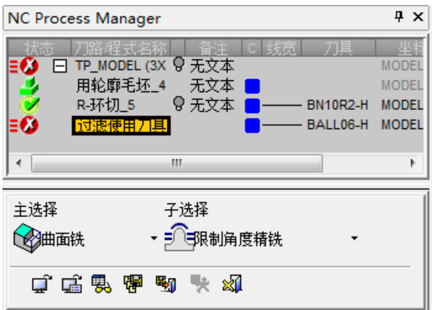
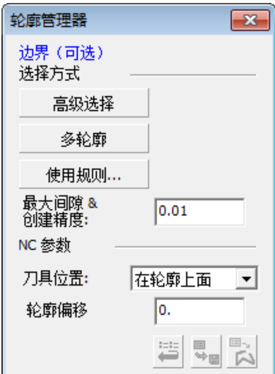


图 2-117　“NC Process Manager”对话框

⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	45
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 2-118　“零件”选项

- 单击“边界（可选）”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 2-119 所示的模型边线作为边界；单击鼠标中键返回“轮廓管理器”对话框，单击确定按钮返回。



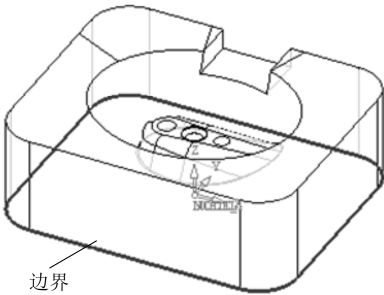


图 2-119　选择边界

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“安全平面”中设置“内部安全高度”为“优化”，其他参数如图 2-120 所示。
- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”

为“0.0000”；其他参数如图 2-121 所示。

参数	值
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	90.0000 ƒ
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5.000000 ƒ
坐标系名称	MODEL

图 2-120　安全平面

参数	值
⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000 ƒ
曲面精度	0.0100 ƒ
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-121　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，选中“垂直区域”复选框，“垂直加工策略”为“变量层”，“限制角度”为“60.0000”；其他参数如图 2-122 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 2-123 所示。

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
水平区域	☐
垂直区域	☑
垂直加工策略	变量层
垂直区域切削方向	混合铣
垂直区域最大粗糙	0.2000
最大切深	0.3000 ƒ
加工由	区域
限制角度	60.0000 ƒ

图 2-122　刀路轨迹参数

参数	值
⊟ 高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000 ƒ

图 2-123　高速铣

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 2-124 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-125 所示。

参数	值
⊟ 机床参数	
Vc(米/分钟)	847.4760
主轴转速	44960
进给(毫米/分钟)	9805.0000
最小拐角进给速度 (	100
进刀速率（%）	100
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-124　设置机床参数

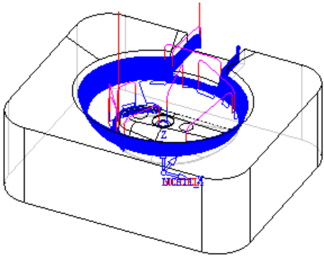


图 2-125　生成的刀具路径

2.1.2.3　曲面铣—精铣水平区域加工

精铣水平区域如图 2-126 所示，用于精加工水平面，生成的刀具路径只加工在同一水平面的曲面加工区域。精铣水平区域一般采用牛鼻刀或者平底刀以较大的侧向步距进行加工。将水平区域单独生成一个加工程序可以有效地提高加工效率。

精铣水平区域的刀路轨迹参数与限制角度精铣中没有垂直区域时的选项基本相同，此处不再说明，读者可参照学习。

操作练习 5：曲面铣精铣水平区域实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise05nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise5\uncompleted\exercise05nc.elt”）文件，单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-127 所示。

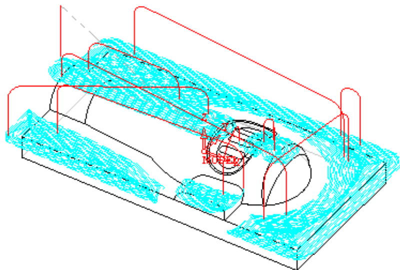


图 2-126 精铣水平区域示例

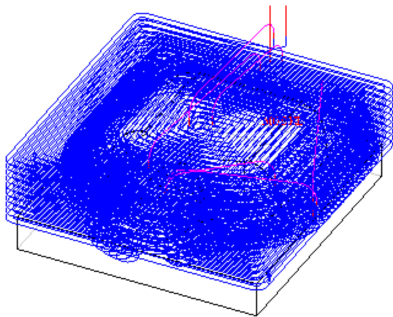


图 2-127 文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BALL06-H”刀具，如图 2-128 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



图 2-128 “刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣水平区域”，如图 2-129 所示。

4）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“43”，如图 2-130 所示。

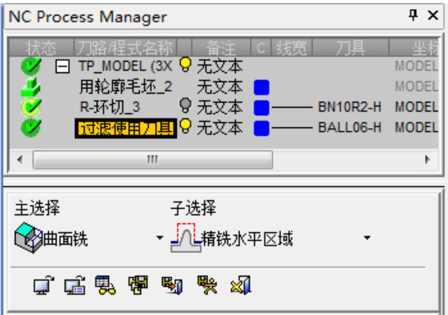


图 2-129　“NC Process Manager”对话框

⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	43
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 2-130　“零件”选项

5）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为 0.0000，其他参数如图 2-131 所示。

● 展开“刀路轨迹”选项，设置“水平加工方法”为“环切”、“水平区域切削方向”为“顺铣”、“水平步距”为“0.3000”，选中“真环切”复选框；其他参数如图 2-132 所示。

参数	值
⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-131　精度和曲面偏移

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
水平加工方法	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由内向外
水平步距	0.3000
真环切	☑

图 2-132　刀路轨迹

● 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 2-133 所示。

参数	值
⊟ 高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000

图 2-133　高速铣

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-134 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-135 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	847.4760
主轴转速	44960
进给(毫米/分钟)	9805.0000
进刀速率（%）	100
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-134　设置机床参数

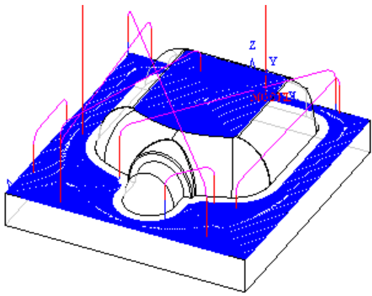


图 2-135　生成的刀具路径

2.1.2.4　曲面铣—轮廓铣加工

轮廓铣包括“开放轮廓”和“封闭轮廓”两种方式。其中：开放轮廓铣是将开放的轮廓线投影在曲面上，生成刀具路径的方法，由加工曲面和开放的轮廓线来限制，主要用于加工一些图案、文字和流道，可作分层加工；封闭轮廓铣是将封闭的轮廓线投影到曲面上，生成刀具路径的方法，由加工曲面和封闭的轮廓线来限制。

下面以封闭轮廓为例来讲解曲面铣—轮廓铣加工参数。封闭轮廓铣刀路轨迹参数如图 2-136 所示。

- 【毛坯宽度】设置需要加工的毛坯宽度，如图 2-137 所示。当设置毛坯宽度大于 0 时，则刀具路径进行多次侧向加工，可设置“侧向步长”参数；当设置毛坯宽度为 0 时，则刀具路径只根据轮廓线进行投影加工。

参数	值
刀路轨迹	
切削深度	2.0000 ƒ
毛坯宽度:	4.0000 ƒ
侧向步长	1.0000 ƒ
裁剪环	局部
向下方式	曲面等距
曲面上切削余量	0.0000 ƒ
曲面下切削余量	1.0000 ƒ
拐角铣削	尖角
切削方向	顺铣

图 2-136　刀路轨迹参数

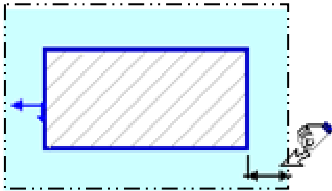


图 2-137　毛坯宽度

- 【裁剪环】：设置相交轮廓的刀具路径轨迹，包括“局部”、“全局”和“关闭”3 个选项，如图 2-138 所示。

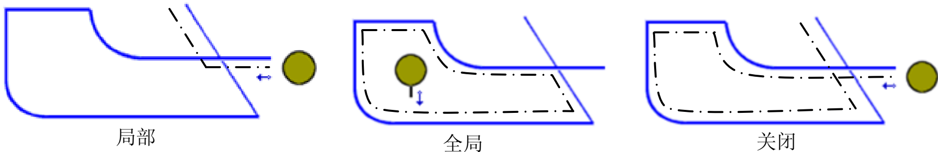


图 2-138　裁剪环

- 【向下方式】：设置刀具路径在 Z 方向上加工时的方式，包括“单个”、“Z

向增量”和“曲面等距”3 种方式。

➢ 〖单个〗：采用单个方式时在 Z 方向只作一层铣削，如图 2-139 所示。

➢ 〖Z 向增量〗：采用 Z 向增量时刀具路径沿 Z 方向曲面上下都指定增量，然后根据深度范围进行多层切削，如图 2-140 所示。此时“曲面上增量 Z”和“曲面下增量 Z”之和即为切削深度范围。

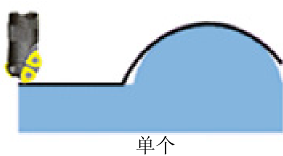


图 2-139　单个方式

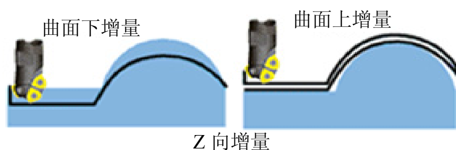


图 2-140　Z 向增量方式

➢ 〖曲面等距〗：选择曲面等距方式时允许在曲面上下都指定偏移值，然后根据深度范围进行多层切削，如图 2-141 所示。此时“曲面上增量 Z”和“曲面下增量 Z”之和即为切削深度范围。

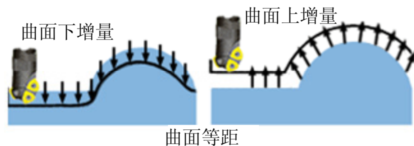


图 2-141　曲面等距方式



注意

Z 向增量和曲面等距虽然都可以产生多层铣削，但是其最后的加工结果会有些区别。为了防止出错，一般在加工曲面时都采用曲面等距方式，这样加工后得到的工件在曲面上凸出或下凹的深度一致；而用 Z 向增量方式，产生曲面的切深小，达不到有效深度，并可能在不同的区域产生不同的深度。

● 【拐角铣削】：设置刀具路径轨迹在加工角位时的移动轨迹，包括“圆角”、“尖角”和“尖角运动”3 个选项，如图 2-142 所示。

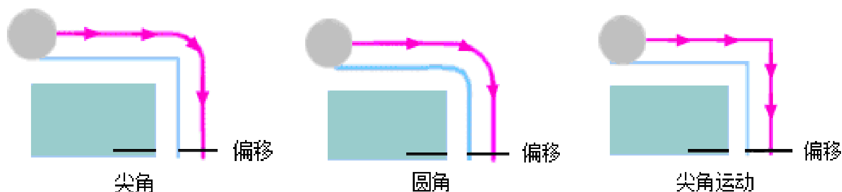


图 2-142　拐角铣削

操作练习 6：曲面铣轮廓铣实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开

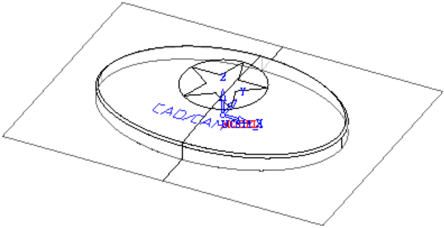


图 2-143　文件调入

文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框；选择“exercise06nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise06\uncompleted\exercise06nc.elt”）文件；单击 Load 按钮✓，完成文件调入，如图 2-143 所示。

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BALL0”直径“2.0”刀具，如图 2-144 所示。依次单击确定按钮✓，完成刀具创建。



图 2-144　“刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“封闭轮廓”，如图 2-145 所示。

4）选择加工曲面和轮廓，具体步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，如图 2-146 所示。

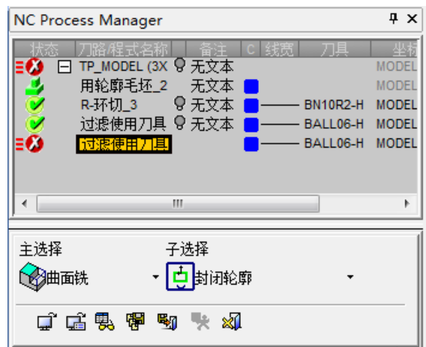


图 2-145　“NC Process Manager”对话框

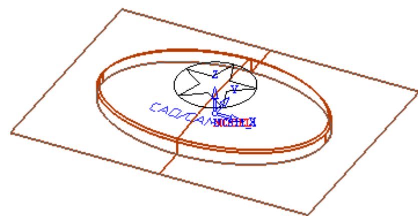


图 2-146　“零件”选项

● 单击“轮廓”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置相关参数如图 2-147 所示，然后选择图 2-148 所示的圆作为轮廓；单击鼠标中键，确认完成轮廓选择，返回程序对话框。

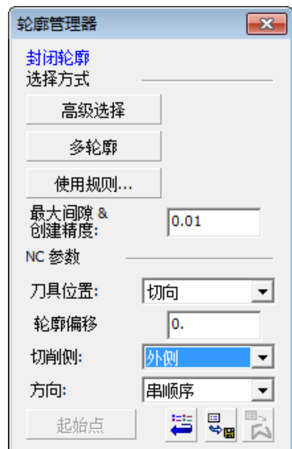


图 2-147　“轮廓管理器”对话框

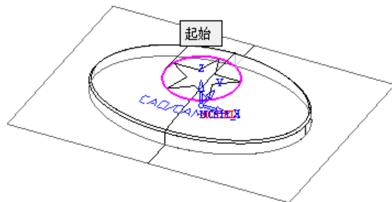


图 2-148　选择轮廓

5）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“−0.9950”；其他参数如图 2-149 所示。

精度和曲面偏移	高级参数
零件加工余量	-0.9950
逼近方式	根据精度
零件曲面精度	0.0100
检查曲面精度	0.0100
轮廓精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-149　精度和曲面偏移

● 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削深度”为“0.5000”，“毛坯宽度”为“1.0000”，“向下方式”为“曲面等距”；其他参数如图 2-150 所示。

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-151 所示。

刀路轨迹	
切削深度	0.5000
毛坯宽度:	1.0000
侧向步长	0.2000
裁剪环	局部
向下方式	曲面等距
曲面上切削余量	0.0000
曲面下切削余量	1.0000
拐角铣削	圆角
切削方向	顺铣

图 2-150　进刀和退刀点参数

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	125.6637
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	8000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
拐角进给速率(%)	30
冷却	冷却液关闭
主轴旋转方向	顺时针
逼近为	标准

图 2-151　设置机床参数

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-152 所示。

8）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“开放轮廓”，如图 2-153 所示。

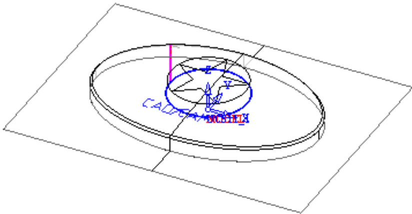


图 2-152　生成的刀具路径

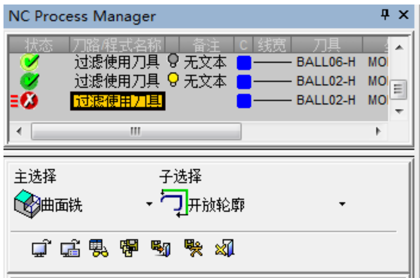


图 2-153　“NC Process Manager”对话框

9）选择轮廓。单击“轮廓”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置相关参数如图 2-154 所示；单击“多轮廓”按钮，然后选择图 2-155 所示的圆作为轮廓；单击鼠标中键确认完成轮廓选择，返回程序对话框。

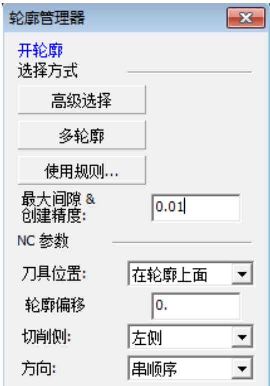


图 2-154　“轮廓管理器”对话框

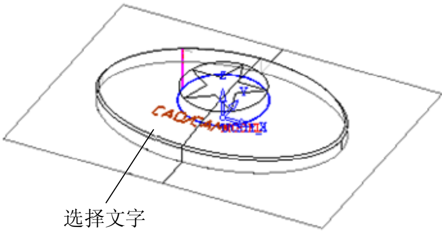


图 2-155　选择轮廓

10）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“-0.9950”；其他参数如图 2-156 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削深度”为“0.5000”，“向下方式”为“曲面等距”；其他参数如图 2-157 所示。

精度和曲面偏移	高级参数
零件加工余量	-0.9950 ƒ
逼近方式	根据精度
零件曲面精度	0.0100 ƒ
检查曲面精度	0.0100 ƒ
轮廓精度	0.0100 ƒ
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-156　精度和曲面偏移

参数	值
刀路轨迹	
切削深度	0.5000 ƒ
毛坯宽度:	0.0000 ƒ
裁剪环	局部
向下方式	曲面等距
曲面上切削余量	0.0000 ƒ
曲面下切削余量	1.0000 ƒ
拐角铣削	圆角
切削方向	单向
切削方向	顺铣

图 2-157　进刀和退刀点参数

11）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-158 所示。

12）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-159 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	125.6637
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	8000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
拐角进给速率(%)	30
冷却	冷却液关闭
主轴旋转方向	顺时针
逼近为	标准

图 2-158　设置机床参数

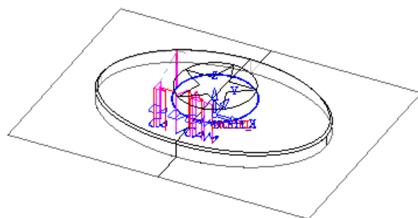


图 2-159　生成的刀具路径

2.1.3　局部精细加工概述

局部精细加工也称为清根加工，沿着零件曲面的凹角和凹谷生成刀路轨迹，主要用于自动清除先前大刀具遗留下来的余料区域。

在 Cimatron E9.0 中局部精细加工包括有以下多个子类型：第一组是 Cimatron E9.0 局部精细加工功能，包括清根铣和笔式铣；第二组是传统加工方法，是从 Cimatron it 继承下来的加工方法，如图 2-160 所示。本节仅介绍 Cimatron E9.0 局部精细加工功能。

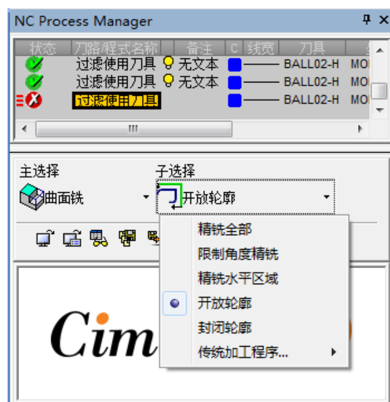


图 2-160　局部精细加工类型

2.1.3.1 局部精细加工——清根铣加工

清根铣生成用于清除前一刀具路径所残留材料的刀具路径，通过设置刀路参数可区分加工区域范围和走刀方式。清根铣刀路轨迹参数，如图 2-161 所示。下面仅介绍其专用的刀路轨迹参数。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
二次开粗	☑
连接区域 (二次开粗)	当前层
垂直步距 (二次开粗)	2.0000
侧向步距(半精加工)	2.0000
偏移(半精加工)	1.5000
加工区域	分割水平/
水平步距	1.0000
减少刀路行数	☑
垂直步进	1.0000
前一把刀偏移	0.1000
前一把刀	B12

图 2-161　刀路轨迹参数

- 【切削方向】：设置刀具切削加工方向，包括“顺铣”、“逆铣”和“混合铣”3 种。
- 【二次开粗】：用于设置是否在清根之前先以体积铣的方式将残余的毛坯材料去除。这种二次开粗是在清根之前进行的，并不影响清根刀轨。
- 【加工区域】：用于设置是否加工水平区域，如果要加工水平区域，需设置“水平步距”。该参数包括以下 4 个选项：
  - 〖分割水平/垂直〗：曲面上的水平区域进行加工，垂直区域进行固定层切加工。
  - 〖全部沿〗：水平区域和垂直区域采用同样的方法进行加工。
  - 〖仅平坦〗：仅进行水平区域加工。
  - 〖仅陡峭〗：仅进行垂直区域加工。



注意

清根铣中的水平区域与垂直区域选项至少要设置一个，而且水平区域和垂直区域是自动判断的，不能人工设置限制角度。

- 【前一把刀偏移】：在前一把刀具加工过的区域中偏移一定距离，以使加工区域和未加工区域之间完全切削，从而达到光顺连接效果，如图 2-162 所示。
- 【前一把刀】：选择本次加工区域的前一个加工程序所使用的刀具，如图 2-163 所示。

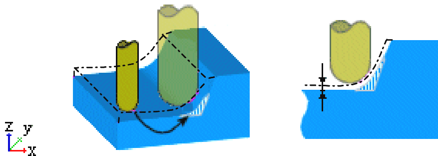


图 2-162　前一把刀偏移

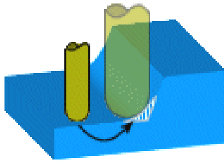


图 2-163　前一把刀



注意

在创建清根铣加工程序时，选择的刀具可以是牛鼻刀、平底刀和球头刀，

但不支持使用带有锥度的刀具，同时前一把刀具也不能使用带有锥度的刀具。另外，选择的当前刀具直径一定要比前一把刀具的直径小，而且使用的当前刀具与前一刀具应该有一致平面长度，如前一把刀具使用球头刀，则当前刀具也应该使用球头刀；如果前一把刀具使用牛鼻刀，则当前刀具可以使用直径为前一刀具直径减去 2 倍拐角半径值的平底刀或者牛鼻刀，而且两把刀具的平面长度相等，即刀具直径减去 2 倍拐角半径值相等。

操作练习 7：清根铣实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise07nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise07\uncompleted\exercise07nc.elt”）文件；单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-164 所示。

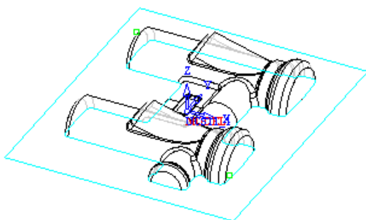


图 2-164　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL0”直径“2.0”刀具，如图 2-165 所示。依次单击“确定”按钮，完成刀具创建。



图 2-165　“刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“局部精细加工”，“子选择”为“清根铣”，如图 2-166 所示。

4）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面，单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，如图 2-167 所示。

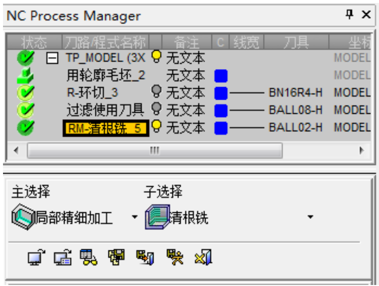


图 2-166 “NC Process Manager”对话框

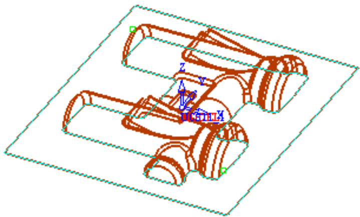


图 2-167 “零件”选项

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“顺铣”，“前一把刀”为“BALL08-H”；其他参数如图 2-168 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 2-169 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	顺铣
二次开粗	☐
加工区域	分割水平/垂直
水平步距	0.1000
减少刀路行数	☑
垂直步进	0.1000
前一把刀偏移	0.0000
前一把刀	BALL08-H

图 2-168 进刀和退刀点参数

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 2-169 高速铣

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-170 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-171 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	125.6637
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	8000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-170 设置机床参数

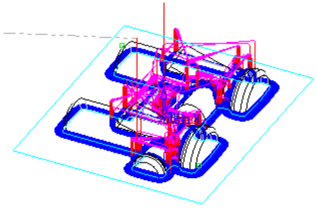


图 2-171 生成的刀具路径

2.1.3.2　局部精细加工——笔式铣加工

笔式铣沿着凹角与沟槽产生一条单一刀具路径，适合于在零件的凹角处生成一个光滑的圆角。笔式铣一般应使用球头刀或者圆角刀进行加工。笔式铣刀路轨迹参数，如图 2-172 所示。笔式铣刀路轨迹参数中需要设置水平区域和垂直区域的运动方向，并设置限制角度用于划分水平区域与垂直区域。下面仅介绍其专用的刀路轨迹参数。

参数	值
刀路轨迹	
水平区域	顺铣
限制角度	33.0000
陡峭区域	两者: 向上
多重	☑
多重方法	Z向增量
行数	2
步距	0.0600

图 2-172　笔式铣刀路轨迹参数

- 【水平区域】：设置刀具水平区域切削加工方向，包括“从不”、“顺铣”、“逆铣”和“混合铣”4 种，其中“从不”表示不生成水平区域的笔式铣刀具路径。
- 【陡峭区域】：设置刀具陡峭区域切削加工方向，包括“从不”、“两者：向上和向下”、“向上”和“向下”4 种。其中“从不”表示不生成陡峭区域的笔式铣刀具路径。
- 【多重】：如果编程者估计上一把刀具在清根部位留下的残料较多，而所用的清根刀具相对较小，吃刀量较深，则可激活“多重”选项。Cimatron E9.0 提供了两种多重方法：Z 向增量和曲面等距。
- 【步距】：相邻刀轨之间的刀心距离。按曲面等距的多重刀轨，它的步距是按照曲面的法向计算的；而按 Z 向增量的多重刀轨，它的步距是按 Z 方向计算的。

操作练习 8：笔式铣实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise08nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise08\uncompleted\exercise08nc.elt”）文件；单击 Load 按钮✓，完成文件调入，如图 2-173 所示。

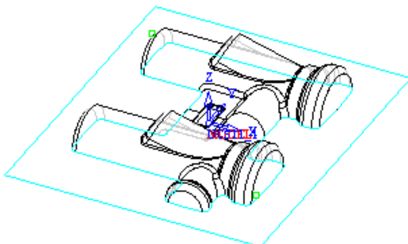


图 2-173　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL0”直径“2.0”刀具，如图 2-174 所示。依次单击确定按钮✓，完成刀具创建。

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“局部精细加工”，“子选择”为“笔式铣”，

如图 2−175 所示。

4）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，如图 2−176 所示。



图 2−174 “刀具库”对话框

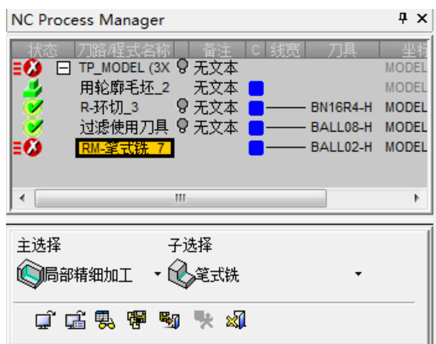


图 2−175 “NC Process Manager”对话框

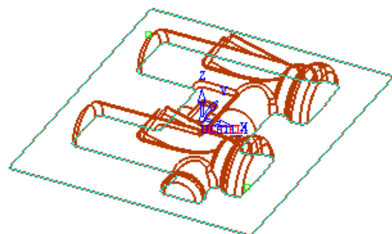


图 2−176 “零件”选项

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“顺铣”，选中“多重”复选框；其他参数如图 2−177 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 2−178 所示。

刀路轨迹	
水平区域	顺铣
限制角度	33.0000
陡峭区域	两者: 向上和向
多重	☑
多重方法	Z向增量
行数	2
步距	0.0200

图 2-177　进刀和退刀点参数

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 2-178　高速铣

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-179 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-180 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	125.6637
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	8000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 2-179　设置机床参数

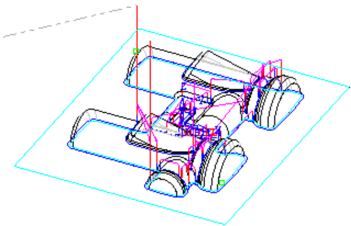


图 2-180　生成的刀具路径

2.2　Cimatron E9.0 四轴高速加工技术

四轴数控加工使用具有三根直线运动轴（X、Y、Z 轴）和一根旋转轴的数控机床来实现。Cimatron E9.0 中提供了局部操作四轴加工和轮廓铣四轴加工等高速加工技术。

2.2.1　局部操作四轴加工

局部操作是一些特殊的曲面铣程序，在某种情况下，这些特殊的曲面铣程序可以针对零件中的局部区域产生比较合理的刀轨。从这个意义上说，局部操作可以说是曲面铣的有力补充。在 Cimatron E9.0 中局部操作包括有：瞄准曲面 4X、零件曲面 4X、直纹面 4X 和局部 4X，下面分别加以介绍。

2.2.1.1　瞄准曲面 4X

瞄准曲面 4X 是在零件曲面上生成由瞄准曲面投影下来的刀具路径，瞄准曲面 4X 在实际应用中常用于曲面环状区域的加工，可以保证各个加工区域的步距是相近的，其残余量较为一致，如图 2-181 所示。

瞄准曲面 4X“NC Process Manager”对话框包括“刀路参数”、“刀具和卡头”、“机床参数”和“零件”4 个部分，相当一部分参数与体积铣或曲面铣相同，下面仅对瞄准曲面 4X 特有的参数作详细介绍。

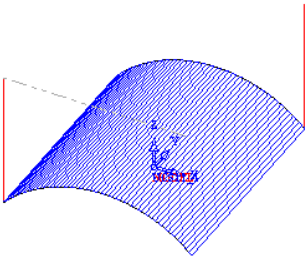


图 2-181　瞄准曲面 4X 示例

1．刀路轨迹

瞄准曲面“步进方式”中不同刀路轨迹的参数不同。瞄准曲面 4X 刀路轨迹参数如图 2-182 所示。

参数	值
刀路轨迹	
残留高度	0.2000
最小 2D 侧向步长	0.0000
切削方向	双向
步进方式	根据残留高度
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
最大步长角度	8.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
重置铣削宽度	重置

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	双向
步进方式	根据行数
行数	10
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
最大步长角度	8.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
重置铣削宽度	重置

参数	值
刀路轨迹	
最大2D侧向步距	3.0000
切削方向	双向
步进方式	最大2D步距
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
最大步长角度	8.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
重置铣削宽度	重置

图 2-182　瞄准曲面 4X 刀路轨迹参数

- 【步进方式】：瞄准曲面 4X 步进方式包括以下 3 种：
  - 〖根据残留高度〗：加工后在刀路轨迹行进方向上的残余部分材料离加工曲面的最大距离。使用该方式确定步进时，需要设置“残留高度”和“最小 2D 侧向步距”。该方式可在某些曲率半径小、精度要求高的曲面上使用，以便在陡峭的曲面部位有较多的走刀次数。
  - 〖根据行数〗：设置所生成刀轨的行数。使用该方式需要输入“行数”。
  - 〖最大 2D 步距〗：所生成刀轨两行之间的 2D 距离，即切削行宽度。
- 【铣削位置】：用于重新定义曲面的铣削加工方向。单击该选项后面的按钮，将使切削侧变更，在图形中以箭头形式显示，如图 2-183 所示。

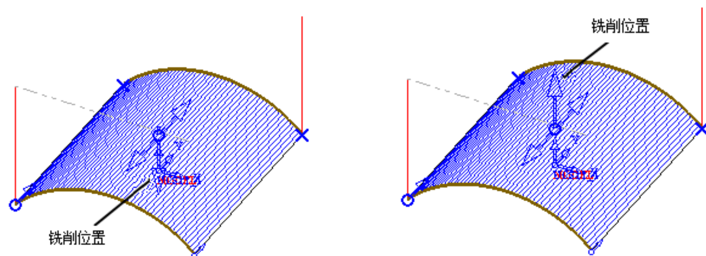


图 2-183 铣削位置

- 【加工方向】：重新定义切削方向。单击“反向”按钮，将在参数线 U 方向与 V 方向间进行切换。在图形上的双向箭头将改变方向，如图 2-184 所示。

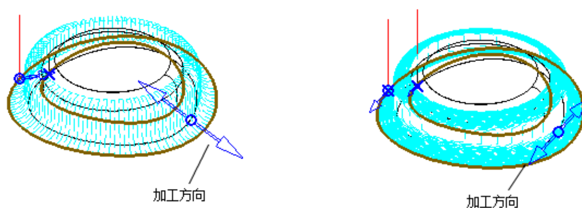


图 2-184 加工方向

- 【重新定义起始角】：单击“选择”按钮可以重新选择起始角，图形曲面角的长箭头将跟随刀指定点，如图 2-185 所示。

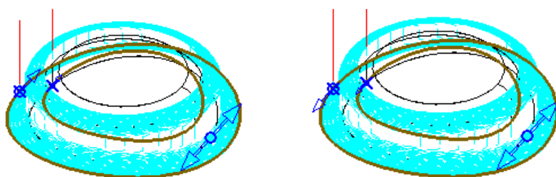


图 2-185 重新定义起始角

- 【临界铣削宽度】：通过指定两点来限制曲面铣削宽度，该参数定义在侧向步距方向上，即切削行之间的连接方向上，如图 2-186 所示。单击“重置铣削宽度”后面的“重置”按钮将恢复到切削完整曲面的宽度。

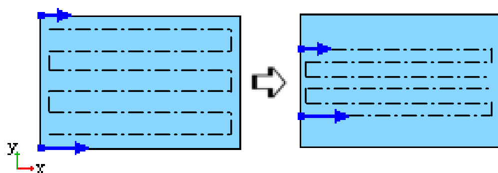


图 2-186 临界铣削宽度

2. 零件

瞄准曲面 4X 加工对象，除了零件曲面和检查曲面之外，还必须指定拾取目标曲面根据，如图 2-187 所示。

参数	值
⊟零件	
零件曲面	16
检查曲面	0
拾取目标曲面根据:	两条轮廓
第一个轮廓	1
第二轮廓	1

图 2-187　零件参数

目标曲面的定义方式有 3 种：两条轮廓、曲面、轮廓和点，下面分别加以介绍：

- 【两条轮廓】：瞄准曲面 4X 使用两条轮廓定义目标曲面时，相当于通过两条轮廓建立一个假想的直纹曲面，然后按该直纹曲面参数线决定刀具路径，如图 2-188 所示。轮廓不但可以决定刀具路径的走向，而且会限定加工范围。

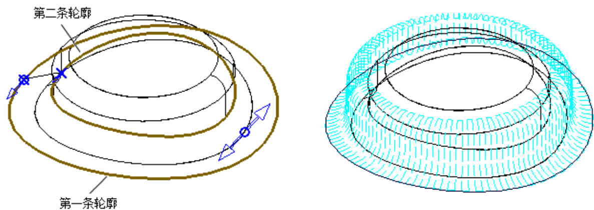


图 2-188　两条轮廓



注意

选择的轮廓所包含的曲线数要相等，同时也要注意选择的次序和串连方向，保证其对应关系，否则将不能生成刀路或者生成的刀路比较紊乱。

- 【曲面】：使用曲面定义目标曲面时，曲面的参数线决定刀具路径；将目标曲面的参数线按 Z 轴方向投影到加工曲面上，在加工曲面上生成刀具路径。



注意

已经选择为加工曲面或者检查曲面的曲面不能当成目标曲面。

- 【轮廓和点】：使用轮廓和点建立假想的直纹曲面，然后将该曲面当作目标曲面，以其参数线方向来定义刀具路径和加工范围，如图 2-189 所示。

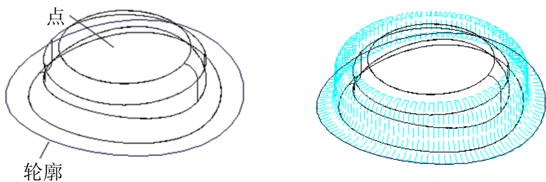


图 2-189　轮廓和点

操作练习 9：瞄准曲面 4X 实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise09nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise09\uncompleted\exercise09nc.elt”）文件；单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-190 所示。

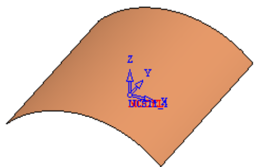


图 2-190　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL0”直径“5.0”刀具，如图 2-191 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



图 2-191　“刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“局部操作”，“子选择”为“瞄准曲面 4X”，如图 2-192 所示。

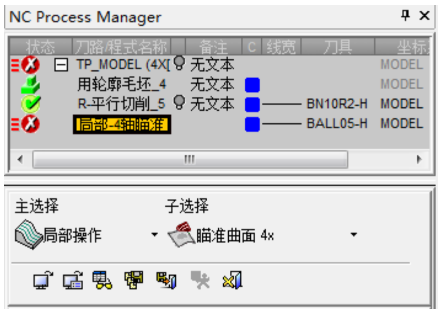


图 2-192　“NC Process Manager”对话框

4）选择加工曲面和轮廓，具体步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，如图 2-193 所示。

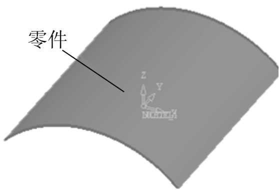


图 2-193 选择加工曲面

- 选择“拾取目标曲面根据”中的“两条轮廓”：单击“第一个轮廓”按钮，选择如图 2-194 所示的边线，单击鼠标中键完成选择；然后单击“第二轮廓”按钮，选择如图 2-194 所示的边线，单击鼠标中键完成选择，返回程序对话框。

参数	值
⊞ 刀具和卡头	BALL05-H
⊞ 机床参数	
⊟ 零件	
零件曲面	0
检查曲面	0
拾取目标曲面根据:	两条轮廓
第一个轮廓	0
第二轮廓	0

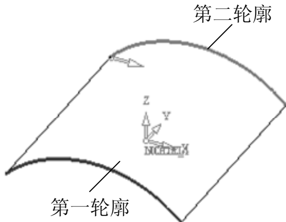


图 2-194 选择加工轮廓

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“0.0000”；其他参数如图 2-195 所示。

⊟ 精度和曲面偏移	高级参数
零件加工余量	0.0000
逼近方式	根据精度
零件曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 2-195 精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“步进方式”为“根据残留高度”，并调整“铣削位置”、“加工方向”和“重新定义起始角”，如图 2-196 所示。

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
残留高度	0.2000
最小 2D 侧向步长	0.0000
切削方向	双向
步进方式	根据残留高度
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
最大步长角度	8.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
重置铣削宽度	重置

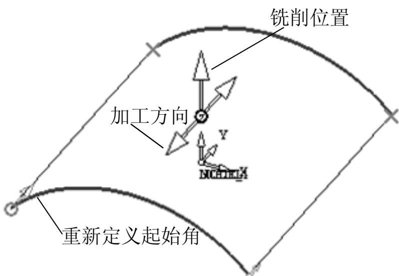


图 2-196 刀路轨迹参数

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-197 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-198 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	314.1593
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关闭
主轴旋转方向	顺时针

图 2-197　设置机床参数

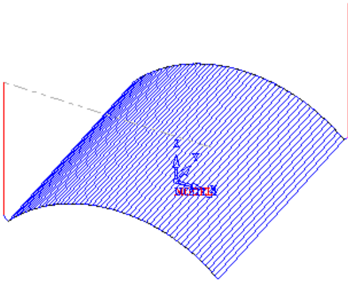


图 2-198　生成的刀具路径

2.2.1.2　零件曲面 4X

零件曲面 4X 是在零件曲面上生成曲面流线方向的刀具路径，其特点是按曲面的流线方向切削一个或者一组连续曲面，如图 2-199 所示。零件曲面 4X 主要用于单个面或相毗邻的几个曲面的加工。当选择一个曲面时，任何形状的曲面都不成问题；当选择两个或两个以上曲面作为零件曲面时，尽量使邻接的曲面有公共边界，并且相邻曲面的参数线方向基本一致。

零件曲面 4X 步进方式不同，刀路轨迹参数也不同，根据残留设定的刀路轨迹参数如图 2-200 所示。

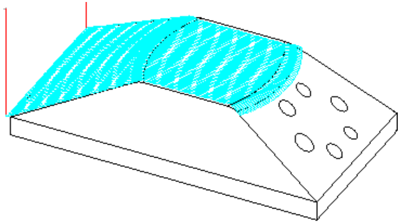


图 2-199　零件曲面 4X 示例

参数	值
刀路轨迹	
残留高度	0.0220 ƒ
最小 3D 侧向步长	0.0000 ƒ
切削方向	双向
方向	两者: 向上
步进方式	根据残留
曲面加工:	串
干涉检查	☑
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
临界铣削长度	选择
重置铣削宽度	重置
重置铣削长度	重置

图 2-200　根据残留设定的刀路轨迹参数

- 【步进方式】：步进方式可以选择“根据残留”、“根据行数”和“根据最大 3D 侧向步长”等方式。与瞄准曲面 4X 相比，其差别在于以 3D 侧向步长代替了 2D 侧向步长。3D 侧向步长是在 3D 方向测量的两切削行间的距离。

- 【曲面加工】：选择了多个相连曲面时，曲面加工可以选择“串”或者“一个接一个”，如图 2-201 所示。选择“串”按曲面串连加工时，将所有曲面看成一个整体，各个曲面的参数线连接起来进行加工；选择“一个接一个”时，逐个曲面进行加工，按次序一个面接一个面进行加工。

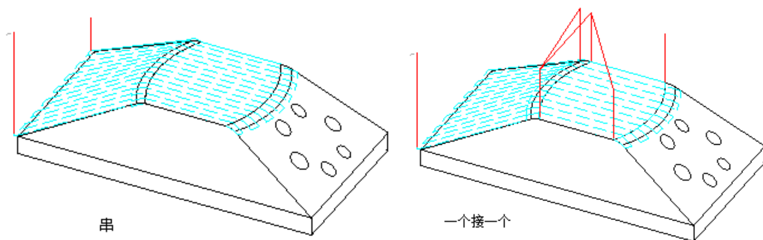


图 2-201　曲面加工

- 【临界铣削长度】：通过指定两点来限制曲面铣削长度，如图 2-202 所示。单击“重置”按钮将恢复到切削完整曲面的长度。

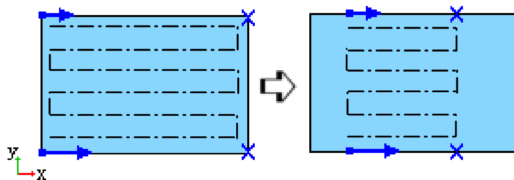


图 2-202　临界铣削长度

操作练习 10：零件曲面 4X 实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise10nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise10\uncompleted\exercise10nc.elt”）文件；单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-203 所示。

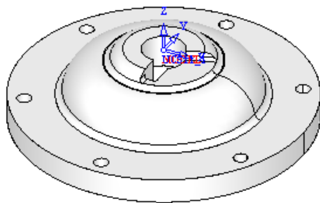


图 2-203　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL05·H”刀具，如图 2-204 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC

Process Manager”对话框，“主选择”为“局部操作”，“子选择”为“零件曲面4X”，如图 2-205 所示。

4）选择加工曲面。展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后选择如图 2-206 所示的曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框。



图 2-204　“刀具库”对话框



图 2-205　“NC Process Manager”对话框

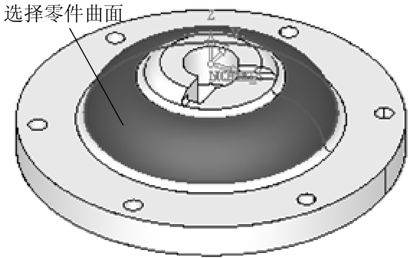


图 2-206　选择加工曲面

5）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为“0.0000”；其他参数如图 2-207 所示。

参数	值
⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
零件曲面精度	0.0100

图 2-207　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“步进方式”为“根据残留高度”，并调整铣削位置、加工方向和重新定义起始角，如图 2-208 所示。

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-209 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-210 所示。

刀路轨迹	
最大 3D 侧向步长	3.6000
切削方向	双向
步进方式	根据最大 3D 侧向
前倾角	0.0000
干涉检查	☐
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
临界铣削长度	选择
重置铣削宽度	重置
重置铣削长度	重置
4 轴联动铣	☑

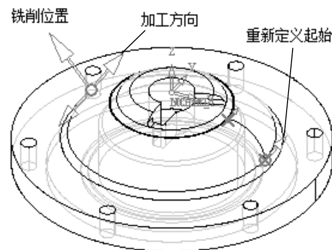


图 2-208　刀路轨迹参数

机床参数	
Vc(米/分钟)	314.1593
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关闭
主轴旋转方向	顺时针

图 2-209　设置机床参数

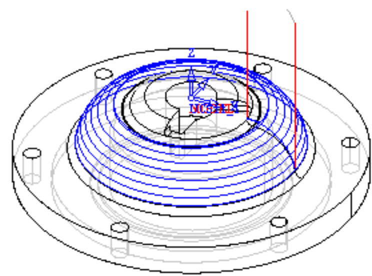


图 2-210　生成的刀具路径

2.2.1.3　直纹面 4X

直纹面 4X 是在空间上生成由两轮廓线构成一个虚拟的直纹曲面上的刀具路径，如图 2-211 所示。直纹面 4X 的加工对象是轮廓，通过轮廓生成的直纹曲面作为零件曲面。

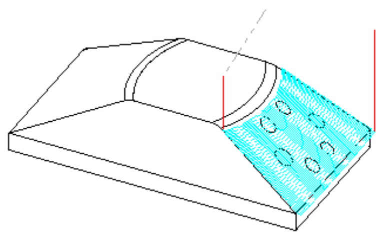


图 2-211　直纹面 4X 示例

直纹面 4X 刀轨参数中的相当一部分与瞄准曲面 4X 和零件曲面 4X 的刀轨参数基本相同，读者可参照进行学习。

操作练习 11：直纹面 4X 实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise11nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise11\uncompleted\exercise11nc.elt”）文件；单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-212 所示。

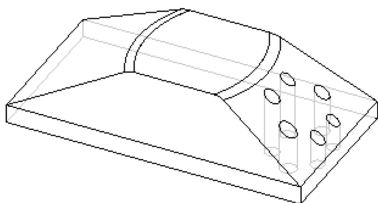


图 2-212　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击刀具库按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL1”直径“10”刀具，如图 2-213 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



图 2-213　“刀具库”对话框

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“局部操作”，“子选择”为“直纹面 4X”，如图 2-214 所示。

4）选择轮廓。选择“轮廓类型”为“开放”，单击“顶部轮廓”按钮，选择如图 2-215 所示的边线；单击鼠标中键完成选择；然后单击“底部轮廓”按钮，选择如图 2-215 所示的边线；单击鼠标中键完成选择，返回程序对话框。

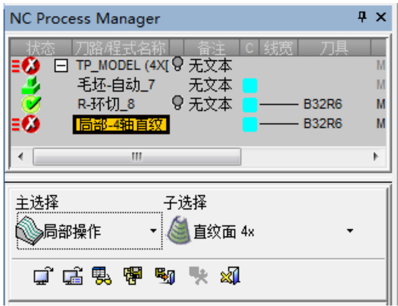


图 2-214　“NC Process Manager”对话框

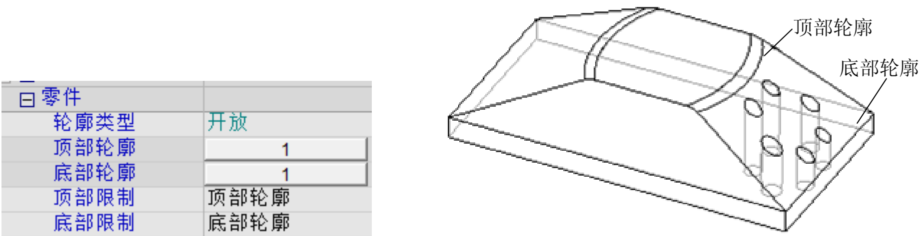


图 2-215　选择加工轮廓

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“参数”为“0.0000”；其他参数如图 2-216 所示。

精度和曲面偏	高级参数
底部曲面偏	0.0000
逼近方式	根据精度
轮廓精度	0.0100
微铣削最大	0.1000

图 2-216　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“步进方式”为“根据行数”，并调整铣削位置，如图 2-217 所示。

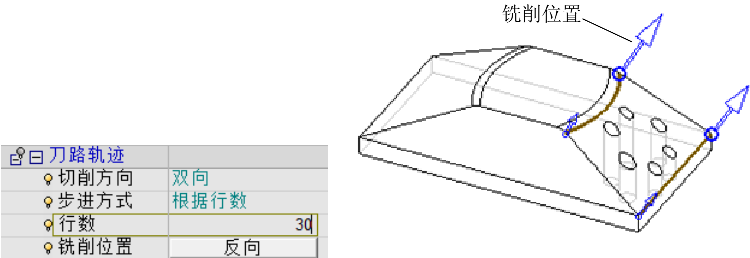


图 2-217　刀路轨迹参数

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-218 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-219 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	314.1593
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关闭
主轴旋转方向	顺时针

图 2-218　设置机床参数

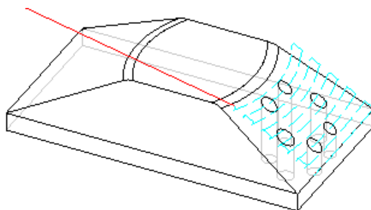


图 2-219　生成的刀具路径

2.2.2　轮廓铣四轴加工

轮廓铣是一种沿着轮廓进行多轴加工的铣削方式，它沿着空间轮廓进行加工，生成的路径与轮廓完全重合。轮廓铣刀路参数如图 2-220 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	双向
行间模式	多个
插铣	深度
深度	1.5000
切削深度	0.7500
步进方式	根据行数
行数	3
右侧宽度	10.0000
左侧宽度	0.0000
最大步长角	8.0000
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
铣削位置	反向

图 2-220　轮廓铣刀路参数

- 【行间模式】：包括两个选项：“多个”和“单个”。单个是指仅在轮廓所在位置生成单一条刀轨；多个可以在轮廓右边或左边生成平行的多个刀轨，此时步进方式可以选择“根据行数”或“通过侧向步长”方式。
- 【插铣】：选择零件曲面后可设置“插铣”选项。“从不”表示仅在曲面上产生刀轨；“深度”可以在曲面上下产生刀轨。此时，“深度”表示加工总深度；“切削深度”表示每层加工深度。

操作练习 12：轮廓铣 4X 实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“打开文件”命令，弹出“Cimatron Explorer”对话框，选择“exercise12nc.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise12\uncompleted\exercise12nc.elt”）文件；单击 Load 按钮，完成文件调入，如图 2-221 所示。

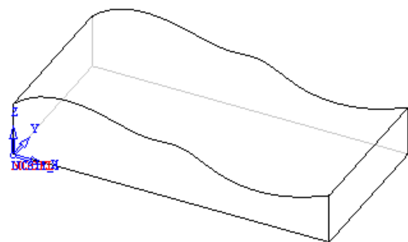


图 2-221　文件调入

2）创建刀具。单击“加工向导”工

具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BALL0”直径“6.0”刀具，如图 2-222 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

3）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“轮廓铣”，“子选择”为“4 轴铣曲线”，如图 2-223 所示。



图 2-222 “刀具库”对话框

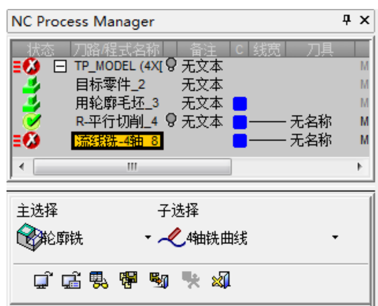


图 2-223 “NC Process Manager”对话框

4）选择零件曲面和轮廓，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面，如图 2-224 所示。单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框。
- 单击“轮廓”按钮，选择如图 2-225 所示的边线，单击鼠标中键完成选择，返回程序对话框。

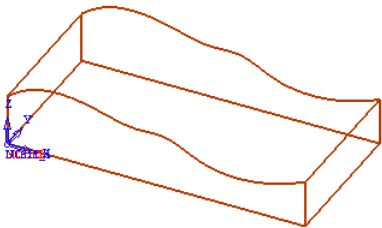


图 2-224 选择加工曲面

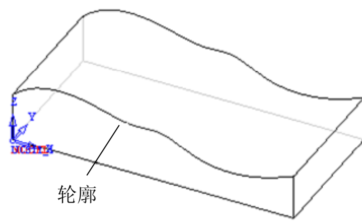


图 2-225 选择加工轮廓

5）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“曲面等距”为“0.0000”；其他参数如图 2-226 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
曲面等距	0.0000
精度	0.0100
微铣削最大轮廓	0.0100

图 2-226　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“行间模式”为“多个”，“插铣”为“深度”，并调整铣削位置和设置其他参数，如图 2-227 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	双向
行间模式	多个
插铣	深度
深度	1.2000
切削深度	0.6000
步进方式	根据行数
行数	30
右侧宽度	0.0000
左侧宽度	30.0000
最大步长角度	8.0000
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
铣削位置	反向

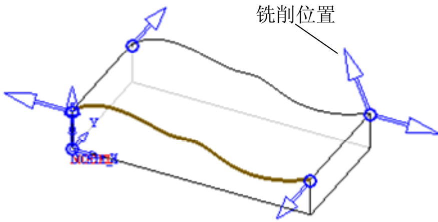


图 2-227　刀路轨迹参数

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 2-228 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-229 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	376.9911
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 2-228　设置机床参数

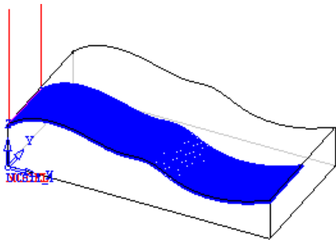


图 2-229　生成的刀具路径

2.3　Cimatron E9.0 五轴高速加工技术

五轴加工主轴或工作台在沿三维坐标做线性移动的同时，还会做旋转移动。Cimatron E9.0 提供了丰富的五轴加工方法：局部操作五轴、轮廓铣五轴、连接五轴和 5X 加工。其中前面的两种加工方法与四轴加工设置基本相同。本节重点介绍最常用的 5X 加工。

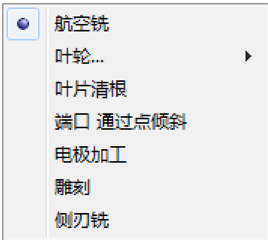


图 2-230　5X 加工方法

5X 加工包括“航空铣”、“叶轮”、“端口通过点倾斜”、“电极加工”、“雕刻”和“侧刃铣”等，如图 2-230 所示。航空铣是通用的五轴加工方法，“叶轮”、“端口通过点倾斜”、“电极加工”、“雕刻”和“侧刃铣”是专用的加工模块，简化了部分参数设置，只保留该模块加工所需设置的参数，因此大大减少了编程操作，提高编程效率。

本节只介绍常用的航空铣和侧刃铣。

2.3.1　航空铣

航空铣是 Cimatron E9.0 多轴加工的主要加工方式之一。它包括了丰富的切削加工方法：平行铣、沿曲线铣、两曲线之间仿形铣、平行于曲线铣、曲线投影铣、两曲面之间仿形铣和平行于曲面铣。

航空铣“NC Process Manager”对话框包括“刀路参数”、“刀具和卡头”、“机床参数”和“零件”等 4 个部分，如图 2-231 所示。

单击“刀具轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框，下面将主要介绍该对话框中最常用的选项参数的含义。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊞ 安全平面	
⊞ 精度和曲面偏移	高级参数
⊞ 刀路轨迹	进入
⊞ 刀具和卡头	无名称_1
⊞ 机床参数	
⊞ 零件	

图 2-231　航空铣“NC Process Manager”对话框

2.3.1.1　曲面路径

“曲面路径”选项卡主要用于设置工艺类型、选择加工角度、导动曲面、区域、工艺、曲面质量等，如图 2-232 所示。

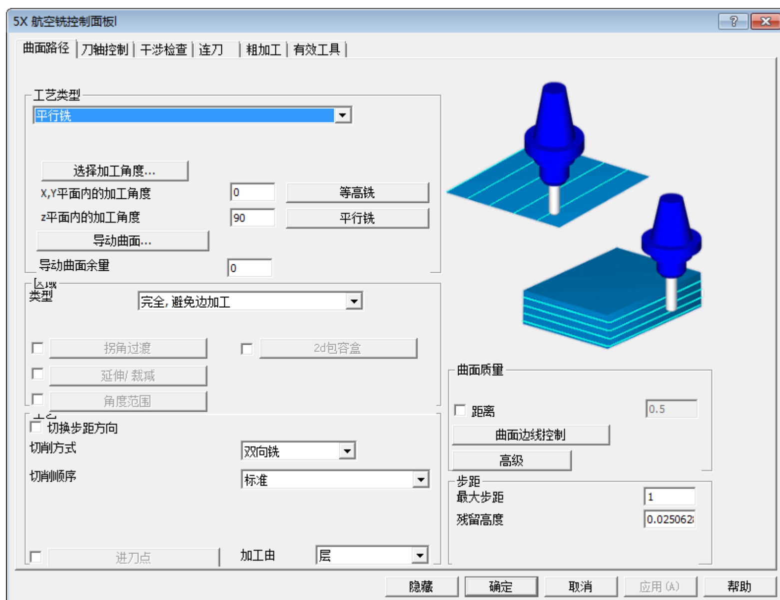


图 2-232　“曲面路径”选项卡

1. 工艺类型

工艺类型用于设置切削加工方法，包括以下选项：

- 【平行铣】：通过改变 XY 和 ZX 两个基准平面内的角度定义刀轨切削方向，如图 2-233 所示。
- 【沿曲线铣】：通过指定一条曲线，引导刀具路径切削方向的加工方式，如图 2-234 所示。

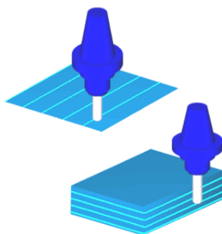


图 2-233　平行铣

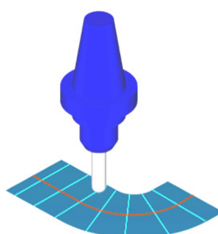


图 2-234　沿曲线铣

- 【两曲线之间仿形铣】：通过指定两条曲线控制刀具路径的起始与终止边界，生成的刀具路径在两条曲线之间过渡，如图 2-235 所示。
- 【平行于曲线铣】：通过指定一条曲线，产生与引导曲线外形相似的刀具路径的加工策略，如图 2-236 所示。

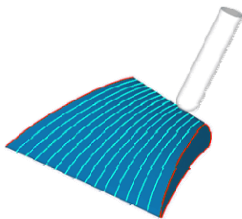


图 2-235　两曲线之间仿形铣

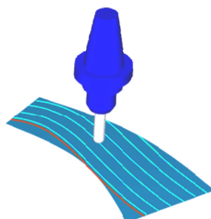


图 2-236　平行于曲线铣

- 【曲线投影铣】：通过选择生成的曲线投影到导动曲面上而产生刀具路径，常用于文字和雕刻加工，如图 2-237 所示。
- 【两曲面之间仿形铣】：通过指定两个曲面控制刀具轴的摆动，并在导动曲面上生成刀具路径，如图 2-238 所示。
- 【平行于曲面铣】：通过指定一组曲面限制刀具路径的加工范围和刀具轴的运动，在驱动曲面上生成刀具路径的加工方法，如图 2-239 所示。

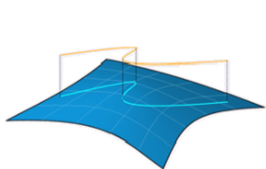


图 2-237　曲线投影铣

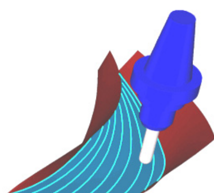


图 2-238　两曲面之间仿形铣

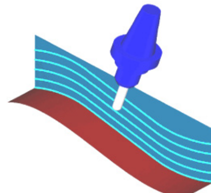


图 2-239　平行于曲面铣

2. **加工角度**

当工艺类型为平行切削时，可设置加工角度。当选择“等高铣”时是保证前视图为 0 角度的一种平行铣削。用户要进行等高铣，只需单击“等高铣”按钮即可，而无需设置任何角度。当选择“平行铣”时可设置如下角度：

- 【XY 平面内的加工角度】：设置刀轨在 XY 平面投影的运动角度，如图 2-240 所示。
- 【ZX 平面内的加工角度】：设置刀轨在 ZX 平面投影的运动角度，如图 2-241 所示。

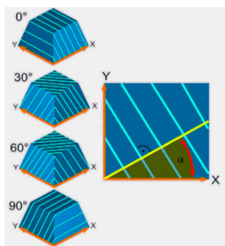


图 2-240　XY 平面内的加工角度

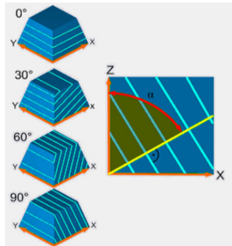


图 2-241　ZX 平面内的加工角度

3. 导动曲面

导动曲面用于设置需要加工的曲面。选择完成曲面后，可在“导动曲面余量”框中输入加工曲面余量大小。

4. 区域

区域用于设置刀轨在边界的生成方式和输出区域，包括以下选项：

- 【类型】：用于控制刀轨与曲面边界的关系，包括“完全，避免边加工”、“完全，曲面起始边和最终加工”、“根据切削数量决定”和“以一点或两点限制切削”，如图 2-242 所示。

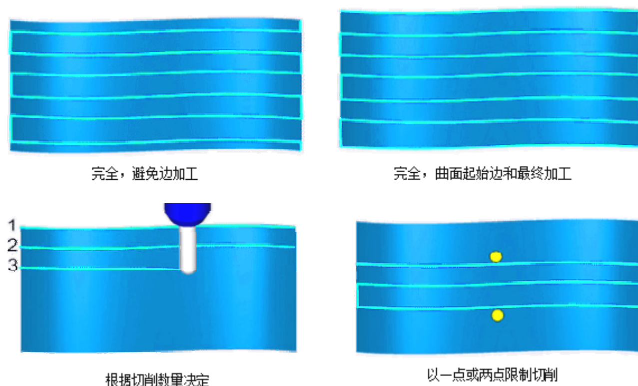


图 2-242　类型

- 【拐角过渡】：用于设置刀轨在转角处的圆角半径。勾选该复选框，单击“拐角过渡”按钮，弹出“拐角过渡”对话框，如图 2-243 所示。

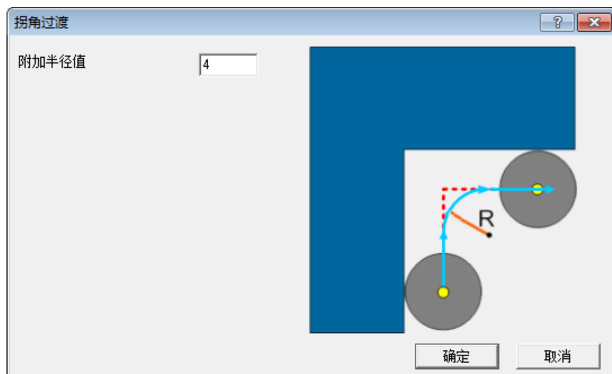


图 2-243　“拐角过渡”对话框

- 【延伸/裁减】：设置刀轨在边界处的延伸或缩短的长度。勾选该复选框，单击“延伸/裁减”按钮，弹出“延伸/裁减”对话框，如图 2-244 所示。

● 【角度范围】：用于将切削区域分拆成平坦和陡峭曲面，并可选择铣削哪部分曲面。勾选该复选框，单击“角度范围”按钮，弹出“角度范围”对话框，如图 2-245 所示。

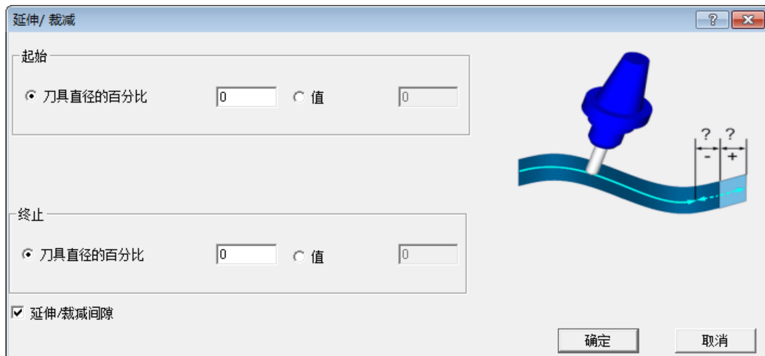


图 2-244 “延伸/裁减”对话框

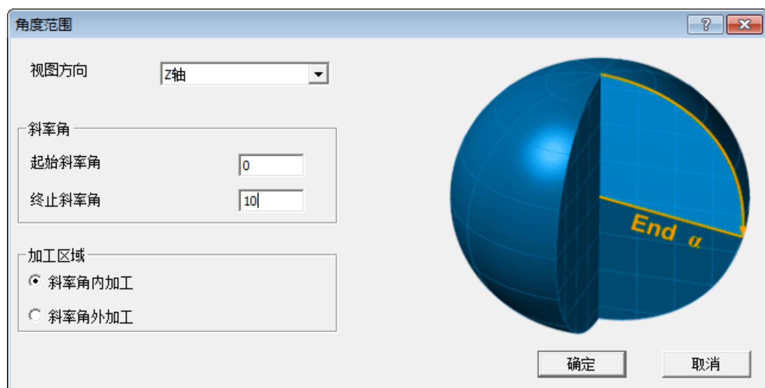


图 2-245 “角度范围”对话框

● 【2d 包容盒】：利用 2D 曲线来限制加工区域。勾选该复选框，单击“2d 包容盒”按钮，弹出“2d 包容盒”对话框，如图 2-246 所示。

5. 工艺

工艺用于设置刀具路径的走刀方式和加工起点，包括以下选项：

● 【切换步距方向】：切换刀轨起始点的方向，如图 2-247 所示。

● 【切削方式】：设置刀轨的走刀方式，包括以下选项：

  ➢ 〖双向铣〗：刀具运动到边界时横向进刀再反向运动，如图 2-248 所示。

  ➢ 〖单向加工〗：刀具运动到边界时抬刀返回起始方向再进入下一路径加工，如图 2-248 所示。

➢ 〖螺旋铣〗：刀具以螺旋方式进行铣削，如图 2-248 所示。

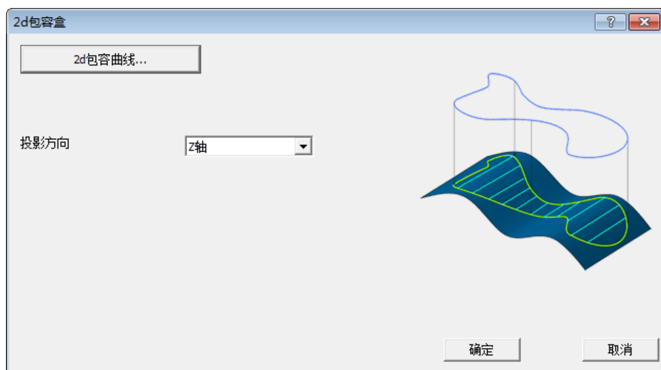


图 2-246 “2d 包容盒”对话框

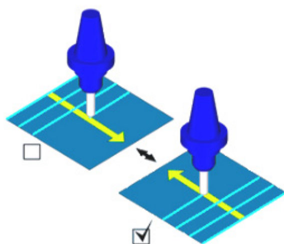


图 2-247　切换步距方向

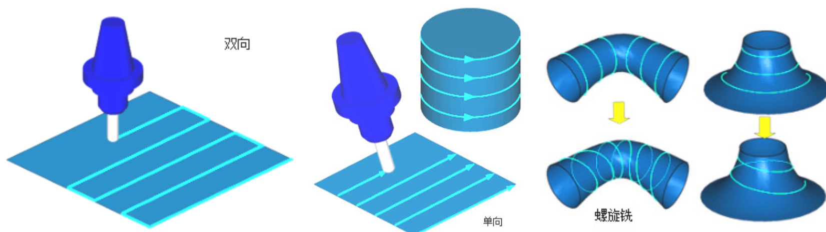


图 2-248　切削方式

- 【切削顺序】：设置刀轨的走刀顺序，包括以下选项：
  ➢ 〖标准〗：刀轨按默认方式走刀，如图 2-249 所示。
  ➢ 〖由内向外〗：由中心向外生成刀轨，如图 2-249 所示。
  ➢ 〖由外向内〗：由外向中心生成刀轨，如图 2-249 所示。

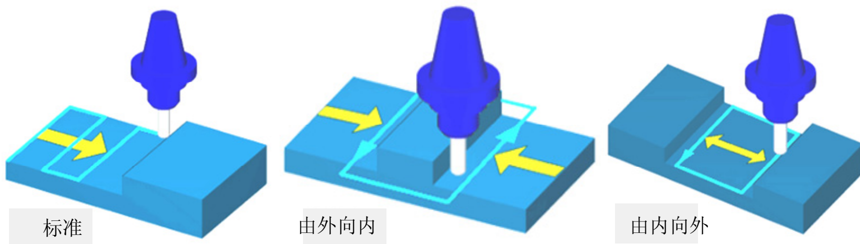


图 2-249　切削顺序

- 【单向切削方向】：设置单向走刀切削方向，当“切削方式”为“单向加工”时有效，包括以下选项：

- 〖逆时针〗：采用单向逆时针方式，如图 2-250 所示。
- 〖顺时针〗：采用单向顺时针方式，如图 2-250 所示。
- 〖顺铣〗：采用单向顺铣方式，如图 2-250 所示。
- 〖逆铣〗：采用单向逆铣方式，如图 2-250 所示。

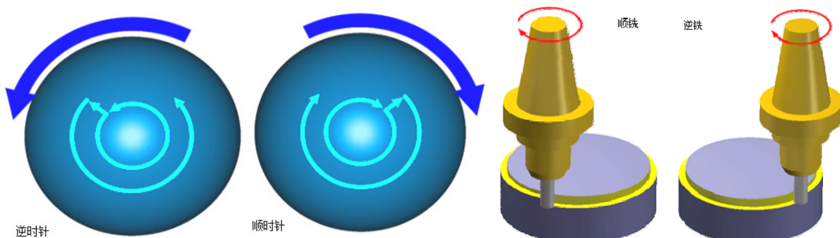


图 2-250　单向切削方向

- 【进刀点】：设置刀具路径的加工起点，如图 2-251 所示。单击 ... 按钮，弹出“位置”对话框，然后再单击 ... 按钮，可在图形区选择一点作为刀具路径的起点。

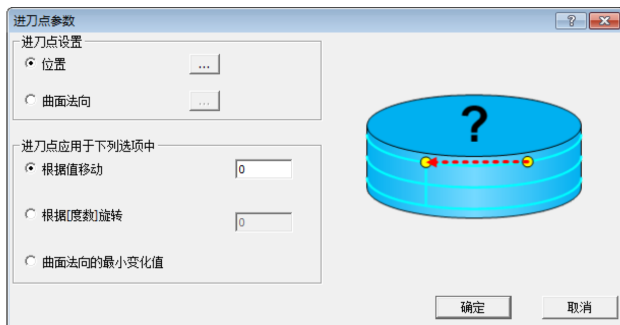


图 2-251　“进刀点参数”对话框

- 【加工由】：设置刀轨深度方向上的加工顺序，包括以下选项：
  - 〖层〗：刀轨完成一层加工后再加工下一层材料，如图 2-252 所示。
  - 〖区域〗：刀轨加工完成一个区域后再加工下一个区域，如图 2-252 所示。

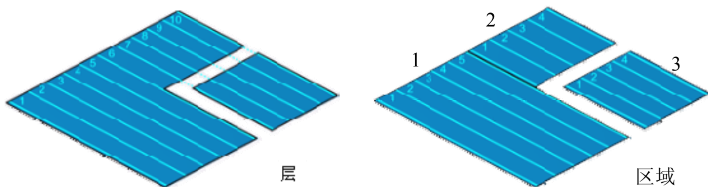


图 2-252　加工由

6. 曲面质量

曲面质量用于设置刀轨插补点距离和切削步距，包括以下选项：

- 【距离】：设置刀轨每个插补点之间的距离，如图 2-253 所示。
- 【步距】：设置每条刀轨路径之间的距离，包括“最大步距”和“残留高度”两个选项，如图 2-254 所示。

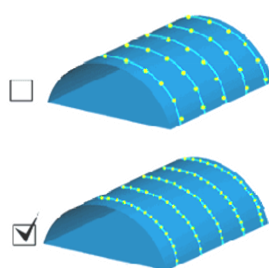


图 2-253　距离

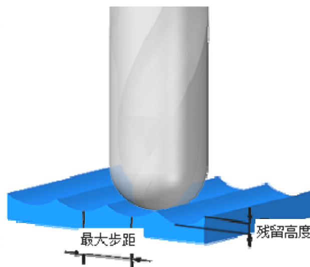


图 2-254　步距

2.3.1.2　刀轴控制

刀轴控制用于设置刀具加工时的刀具轴线运动方式。在 Cimatron E9.0 多轴加工中，刀轴不再是恒定的，而是可以调整的。下面介绍常用的刀轴控制方法，如图 2-255 所示。

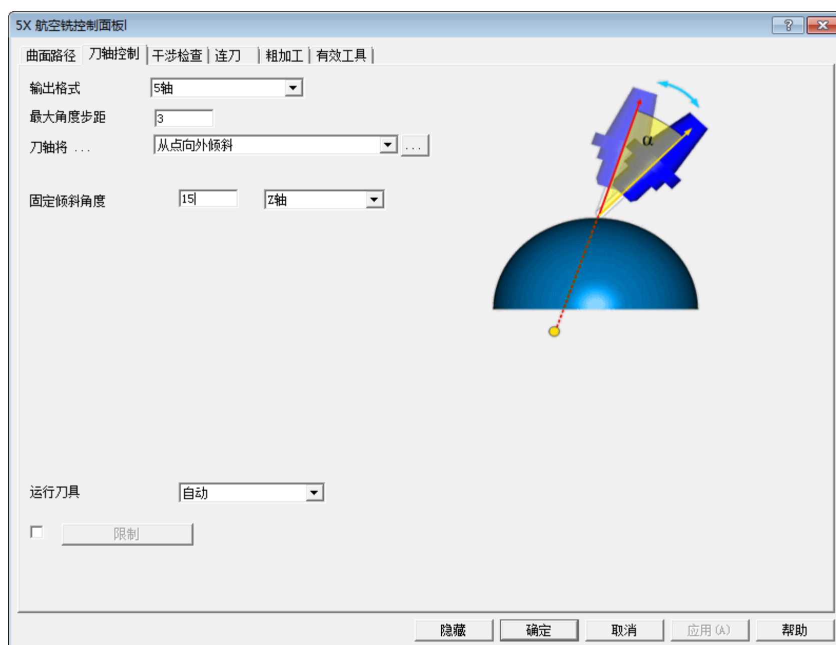


图 2-255　刀轴控制

1. 输出格式

用于设置刀轴控制方式和代码输出方式，包括以下选项，如图 2-256 所示：

- 【3 轴】：设置刀轴的控制方式为 3 轴。
- 【4 轴】：设置刀轴的控制方式为 4 轴。
- 【5 轴】：设置刀轴的控制方式为 5 轴。

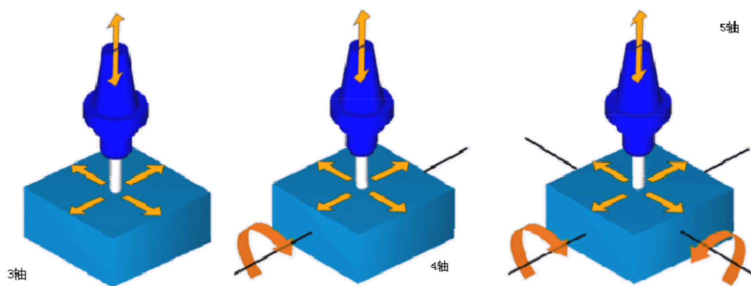


图 2-256 输出格式

2. 刀轴将

用于设置刀轴控制方式，包括以下选项：

- 【没有倾斜，保持与曲面垂直】：刀轴沿着曲面法线方向，如图 2-257 所示。
- 【相对切削方向倾斜】：刀轴相对于切削方向成固定夹角，包括前倾角和侧倾角，如图 2-258 所示。

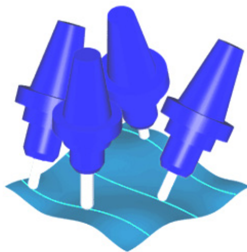


图 2-257 没有倾斜，保持与曲面垂直

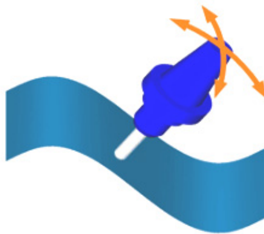


图 2-258 相对切削方向倾斜

- 〖切削方向上的前倾角〗：前倾角为刀轴与刀具路径切削方向所成角度，它从加工方向的垂直线开始测量。前倾角的作用是使用球头刀具加工平面区域时，避免刀具切削点落在球刀中心尖点上，如图 2-259 所示。通常将前倾角设置为 15°。
- 〖切削方向上的侧倾角〗：用于定义刀轴与刀具路径切削方向左侧向的夹角。侧倾角的作用是在切削陡峭部件时，避免刀柄与零件发生碰

撞，如图 2-260 所示。

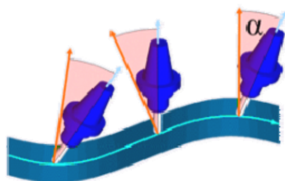


图 2-259　前倾角

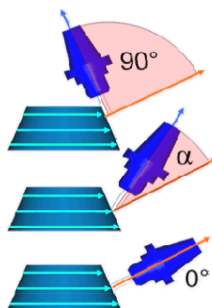


图 2-260　侧倾角

- 【根据角度倾斜、以固定角度倾斜至轴、绕轴旋转】：通过设置一个基准轴和固定角度，限制刀轴方向，如图 2-261 所示。该 3 种方式的有关参数基本相同，下面集中加以介绍。
  - 〖倾斜角〗：设置刀轴与固定基准轴的夹角。可以选择 X 轴、Y 轴、Z 轴和直线作为基准轴。
  - 〖刀具交叉于倾斜轴〗：设置生成的刀轴指向基准轴，如图 2-262 所示。
  - 〖反向刀具〗：设置改变刀轴的法向，如图 2-263 所示。

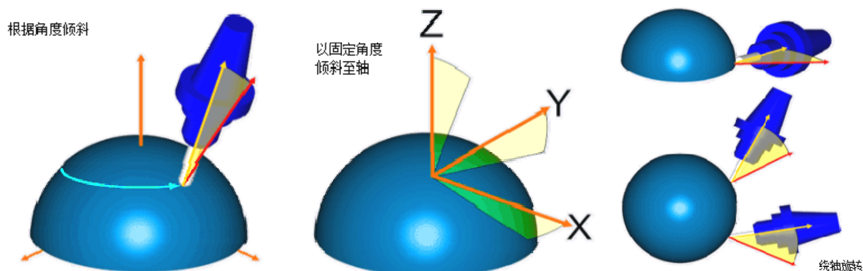


图 2-261　根据角度倾斜、以固定角度倾斜至轴、绕轴旋转

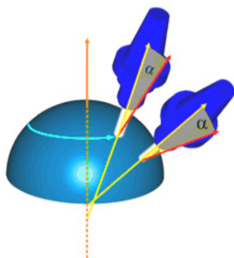


图 2-262　刀具交叉于倾斜轴

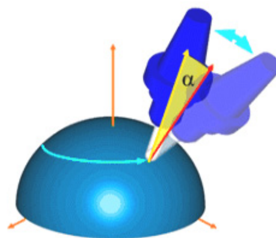


图 2-263　反向刀具

- 【通过点倾斜、从点向外倾斜】：通过指定一点和输入倾斜角度限制刀轴，该两种方式的含义如下：
  - 〖通过点倾斜〗：指刀具刀尖总是远离固定点，即刀具刀尖连续动作，而与铣床相连的刀具头部保持相对静止，如图 2-264 所示；适合于加工型腔等凹型面，特别是加工带有型腔、负角面的凹模零件。
  - 〖从点向外倾斜〗：指刀具刀尖总是指向固定点，即与铣床相连的刀具头部连续动作，而刀具刀尖保持相对静止，如图 2-265 所示；适合于加工型芯等凸型面，特别是加工带有陡峭凸壁、负角面的零件。
- 【通过曲线倾斜、从曲线向外倾斜】：通过指定曲线和设置倾斜角度控制刀轴，包括以下两种方式：
  - 〖通过曲线倾斜〗：指刀具刀尖总是远离用户定义的曲线，如图 2-266 所示。
  - 〖从曲线向外倾斜〗：指刀具刀尖总是指向用户定义的曲线，如图 2-267 所示。

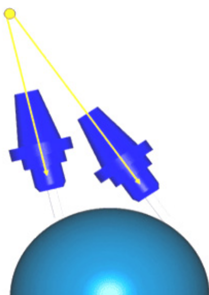


图 2-264　通过点倾斜

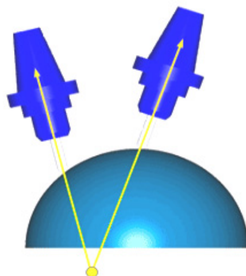


图 2-265　从点向外倾斜

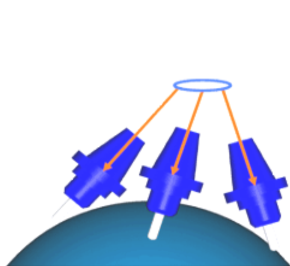


图 2-266　通过曲线倾斜

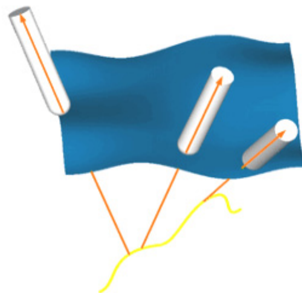


图 2-267　从曲线向外倾斜

- 【通过直线倾斜】：通过定义边界直线确定刀轴方向，如图 2-268 所示。

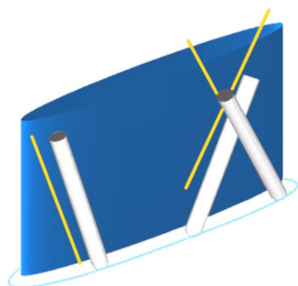


图 2-268　通过直线倾斜

3．运行刀具

用于设置刀具与零件曲面的接触方式，包括以下选项：

- 【自动】：根据零件表面形状自动确定刀具接触点，如图 2-269 所示。
- 【在刀心】：以刀具中心作为刀具与零件曲面的接触点，如图 2-270 所示。

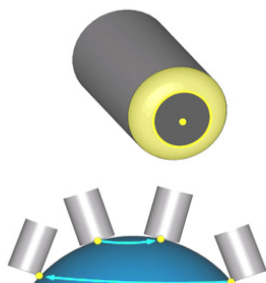


图 2-269　自动

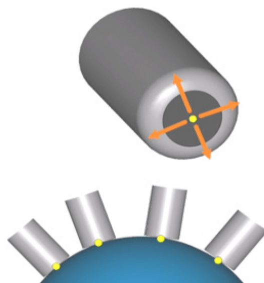


图 2-270　在刀心

- 【接触点】：刀具上任何位置均有可能成为刀具与零件的接触点，如图 2-271 所示。
- 【在端点】：以刀具的 4 个象限点作为刀具与零件曲面的接触点，如图 2-272 所示。

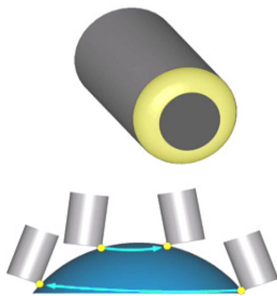


图 2-271　接触点

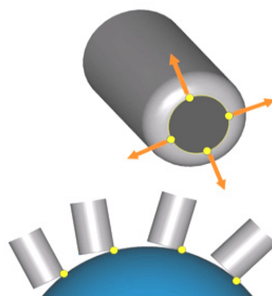


图 2-272　在端点

● 【用户自定义点】: 通过设置距离值控制刀具与曲面的接触点，如图 2-273 所示。

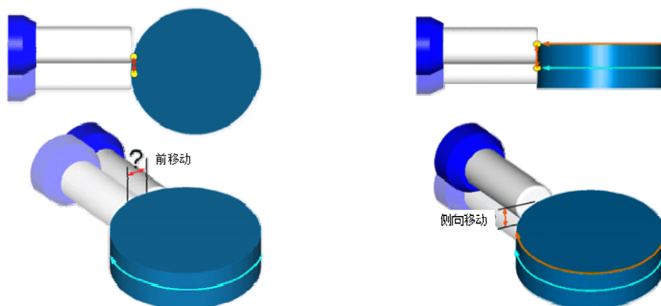


图 2-273　用户自定义点

4. **限制**

用于控制刀轴的摆动范围。勾选“限制”复选框，单击“限制”按钮，弹出“限制”对话框，如图 2-274 所示。

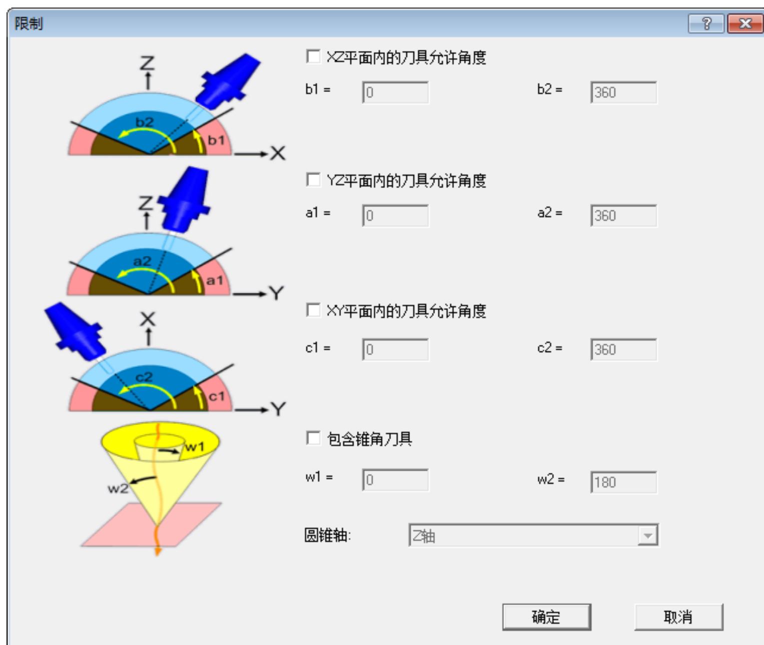


图 2-274　“限制”对话框

2.3.1.3　干涉检查

干涉检查用于检查刀具与夹头在运动过程中是否与工件存在碰撞，以及在碰

撞的情况下采取的避让措施，如图 2-275 所示。

1）状态。用于设置刀具碰撞检查选项。勾选相应选项后，该级别的碰撞检查将设置为有效状态。

2）检查。设置碰撞检查的类型，包括切削刃、刀杆、刀柄和夹头等 4 个级别。

3）策略和参数。用于设置刀具与检查曲面发生干涉时采取的避让策略，包括以下选项：

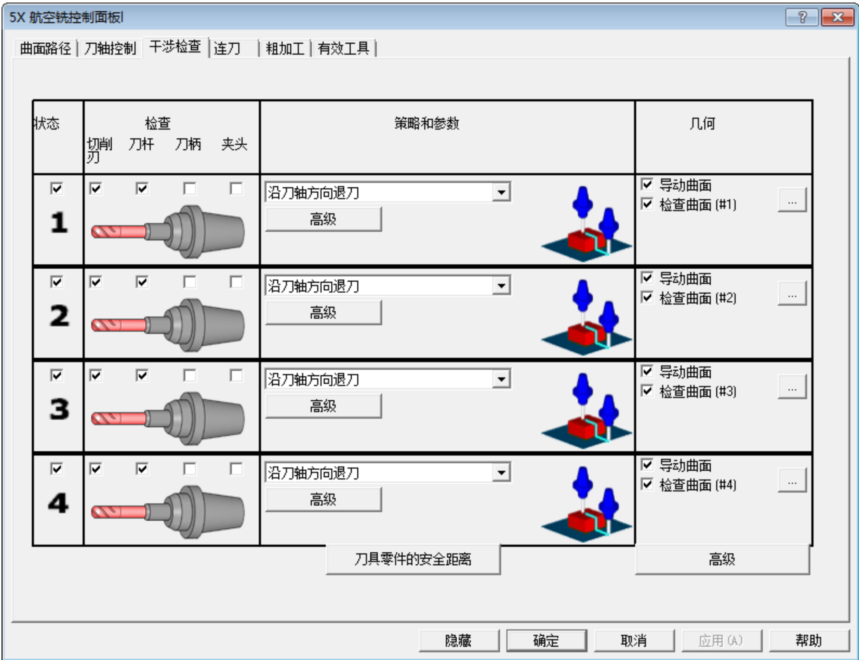


图 2-275　干涉检查

- 【沿刀轴方向退刀】：当刀具与检查面接触时，刀具沿刀轴方向退刀避让检查面。
- 【刀具向外移动】：当刀具与检查面接触时，刀具可以向外移动以避让检查面。
- 【以最大角度倾斜刀具】：当刀具与检查面接触时，刀具旋转轴在设置角度范围内避让检查面。
- 【忽略干涉点】：当刀具与检查面接触时，不产生干涉部分的刀具路径。刀具沿主轴方向抬刀，再移动到下一路径进行加工。
- 【停止刀路计算】：当刀具与检查面接触时，停止所有刀具路径的计算。

4）几何。选择检查曲面和设置刀具与检查曲面的最小距离参数。

- 【导动曲面】：设置刀具与检查曲面的安全区域。

● 【检查曲面】：单击“检查曲面”按钮，选择需要进行碰撞检查的曲面。

2.3.1.4 连刀

连刀用于设置每段刀具路径之间的过渡方式、连接距离等非切削参数，如图 2-276 所示。合理的连刀方式可以降低刀具路径的非切削时间，也有利于延长刀具的使用寿命。

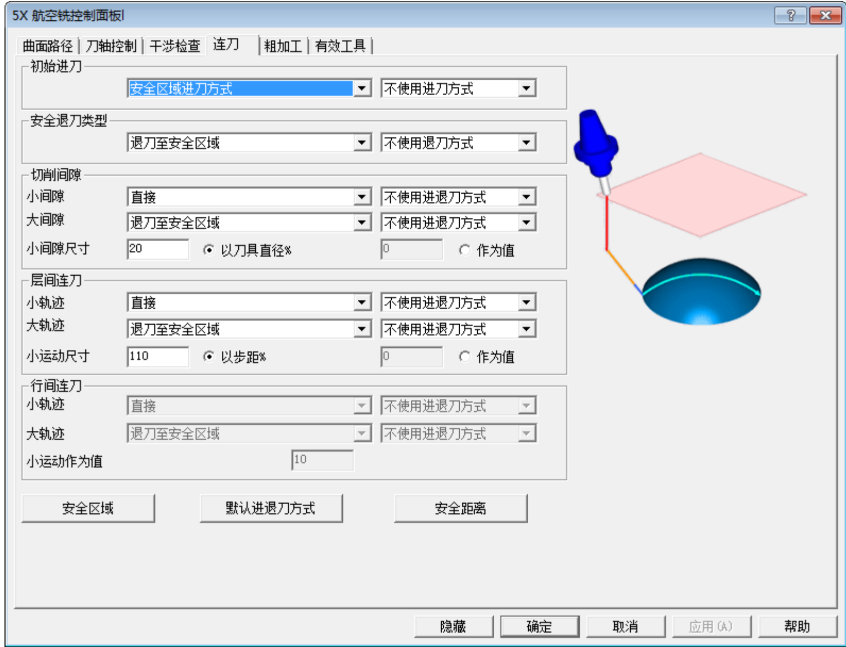


图 2-276 连刀

1. 初始进刀

设置初始进刀方式，包括以下选项：

● 【安全区域进刀方式】：从设置的安全平面距离开始进刀，如图 2-277 所示。安全距离可单击窗口下部“安全区域”按钮进行设置。

● 【快速走刀距离进刀方式】：在已设置的快速安全区域最高点开始进刀，如图 2-278 所示。快速安全区域可单击窗口下部“安全距离”按钮进行设置。

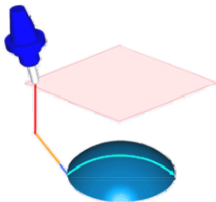


图 2-277 安全区域进刀方式

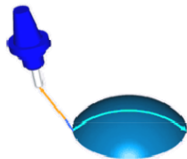


图 2-278 快速走刀距离进刀方式

- 【进给距离进刀方式】：在已设置的进给距离的最高点开始进刀，如图 2-279 所示。进给距离可单击窗口下部“进给距离”按钮进行设置。
- 【直接】：在进刀点直接开始进刀，如图 2-280 所示。

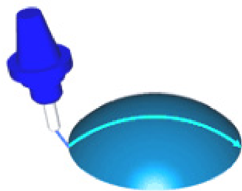


图 2-279　进给距离进刀方式

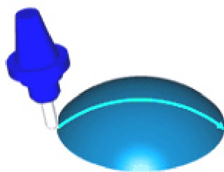


图 2-280　直接

- 【使用进刀方式】：使用与加工曲面曲面相切的方式进入加工表面，如图 2-281 所示。
- 【不使用进刀方式】：使用与曲面法向重合的方式进入加工表面，如图 2-282 所示。

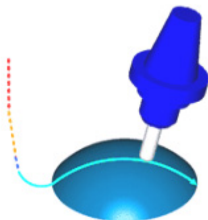


图 2-281　使用进刀方式

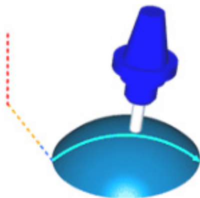


图 2-282　不使用进刀方式

2. 安全退刀类型

设置退刀方式，包括以下选项：

- 【退刀至安全区域】：退刀至设置的安全平面，如图 2-283 所示。安全距离可单击窗口下部“安全区域”按钮进行设置。
- 【退刀至快速距离位置】：退刀至已设置的快速安全区域，如图 2-284 所示。快速安全区域可单击窗口下部“安全距离”按钮进行设置。

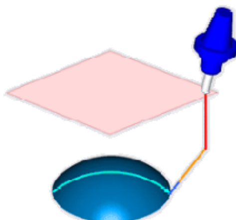


图 2-283　退刀至安全区域

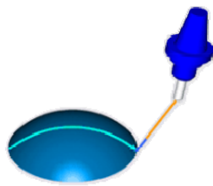


图 2-284　退刀至快速距离位置

- 【退刀至进给距离位置】：退刀至已设置的进给距离的最高点，如图 2-285

所示。进给距离可单击窗口下部“进给距离”按钮进行设置。

- 【直接】：直接在退刀点退刀，如图 2-286 所示。

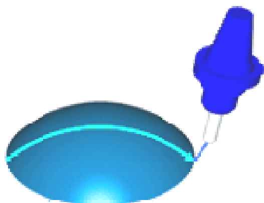


图 2-285 退刀至进给距离位置

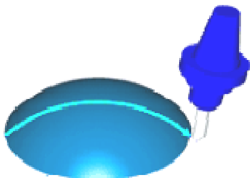


图 2-286 直接

- 【使用退刀方式】：使用与加工曲面相切的方式退出加工表面，如图 2-287 所示。
- 【不使用退刀方式】：使用与曲面法向重合的方式退出加工表面，如图 2-288 所示。

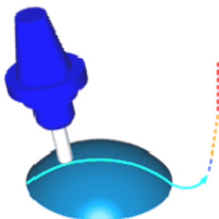


图 2-287 使用退刀方式

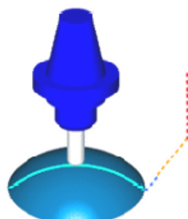


图 2-288 不使用退刀方式

3. 切削间隙

用于设置刀具路径在零件间隙处的连接方式，包括以下连接方式。

- 【直接】：刀具以最短距离运动至下一段刀轨，如图 2-289 所示。
- 【沿曲面】：刀具沿引导曲面延伸再运动至下一段刀具路径，如图 2-290 所示。

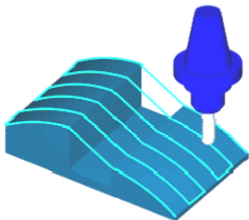


图 2-289 直接

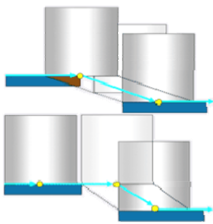


图 2-290 沿曲面

- 【混合样条线】：刀具以相切圆弧连接的方式运动到下一段刀具路径，如图 2-291 所示。

- 【退刀至进给距离位置】：刀具退刀至进给距离位置，再运动到下一段刀具路径，如图 2-292 所示。

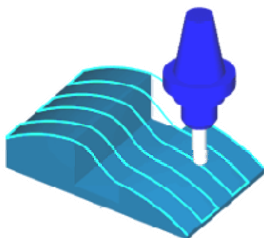


图 2-291　混合样条线

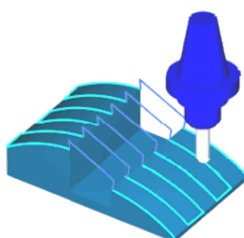


图 2-292　退刀至进给距离位置

- 【退刀至快速距离位置】：刀具退刀至快速距离位置，再运动到下一段刀具路径，如图 2-293 所示。
- 【退刀至安全区域】：刀具退刀至安全平面位置，再运动到下一段刀具路径，如图 2-294 所示。

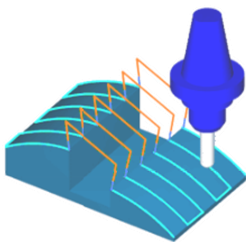


图 2-293　退刀至快速距离位置

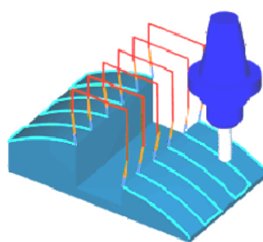


图 2-294　退刀至安全区域

4. 层间连刀

设置切削路径层间刀轨连接方式，包括以下选项：

- 【直接】：刀具以最短距离运动至下一行刀轨，如图 2-295 所示。
- 【沿曲面】：刀具沿引导曲面运动至下一行刀具路径，如图 2-296 所示。

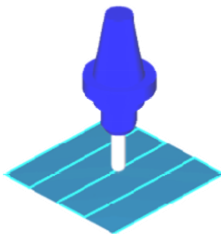


图 2-295　直接

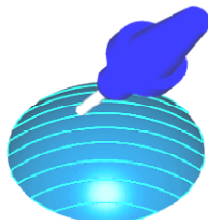


图 2-296　沿曲面

- 【混合样条线】：刀具以相切圆弧连接的方式，运动至下一行刀具路径，如图 2-297 所示。

- 【退刀至进给距离位置】：刀具退刀至进给距离位置，再运动至下一行刀具路径，如图 2-298 所示。

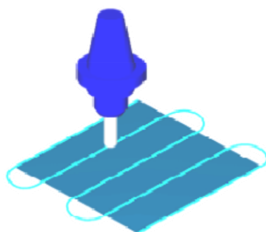


图 2-297 混合样条线

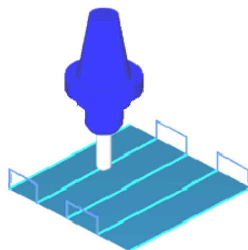


图 2-298 退刀至进给距离位置

- 【退刀至快速距离位置】：刀具退刀至快速距离位置，再运动到下一行刀具路径，如图 2-299 所示。
- 【退刀至安全区域】：刀具退刀到安全平面位置，再运动至下一行刀具路径，如图 2-300 所示。

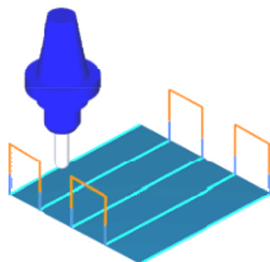


图 2-299 退刀至快速距离位置

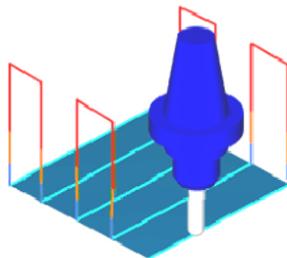


图 2-300 退刀至安全区域

5. 安全区域

用于设置安全平面类型和数值。单击“安全区域”按钮，弹出“安全区域”对话框，如图 2-301 所示。

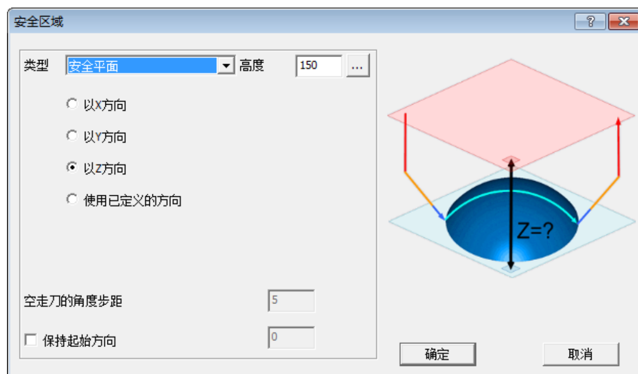


图 2-301 “安全区域”对话框

● 【类型】：设置安全平面类型，包括“安全平面”、“圆柱面”和“球面”等，如图 2-302 所示。

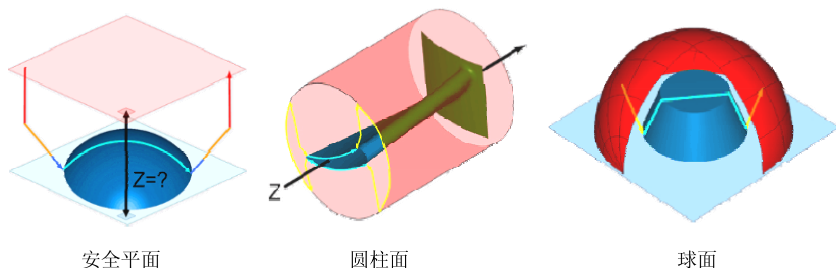


图 2-302　类型

6. 默认进退刀方式

用于设置刀具接近工件表面时的进退刀方式，如图 2-303 所示。

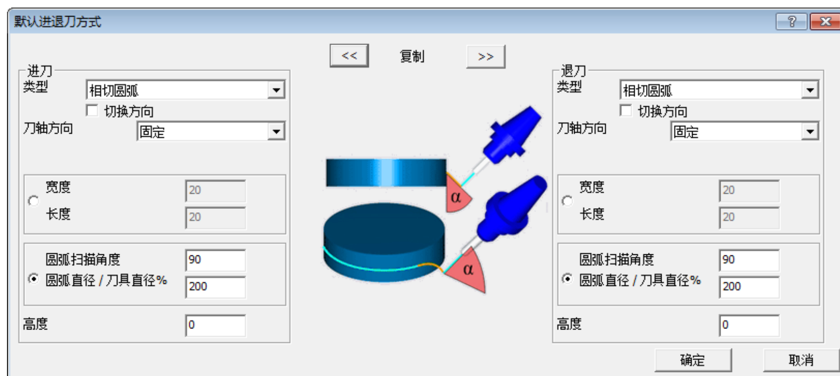


图 2-303　默认进退刀方式

● 【类型】：用于设置进退刀类型，包括“相切圆弧”、“反向相切圆弧”、“垂直相切圆弧”、“反向垂直相切圆弧”、“垂直圆弧”、“切线”、“反向切线”、“法向直线”和“反向垂直的螺旋轨迹”等。
● 【刀轴方向】：用于设置进退刀时的刀轴控制方式，包括“固定”、“相切”和“倾斜”等。

7. 安全距离

安全距离用于设置快速距离、进给距离和空走刀安全距离，如图 2-304 所示。

● 【快速距离】：用于设置快速运动段的距离，如图 2-305 所示。
● 【进给距离】：用于设置进给运动段的距离，如图 2-306 所示。
● 【空走刀安全距离】：用于设置刀具空运行时与零件最高点的安全区域，如图 2-307 所示。

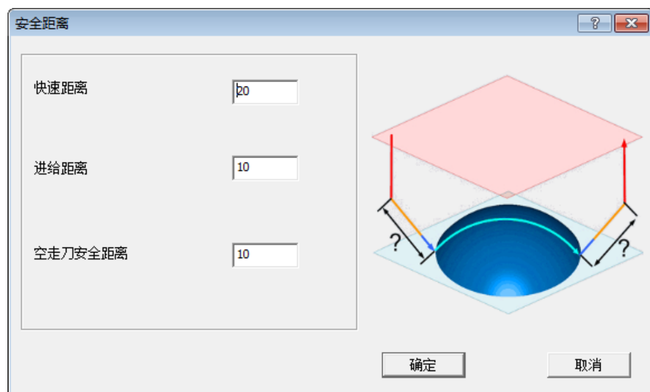


图 2-304　安全距离

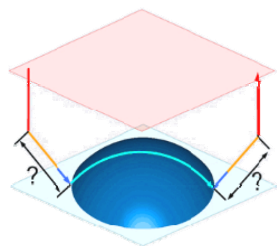


图 2-305　快速距离

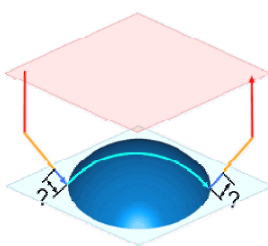


图 2-306　进给距离

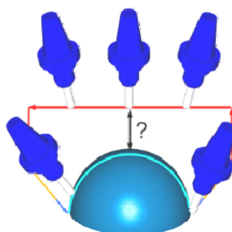


图 2-307　空走刀安全距离

操作练习 13：航空铣实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”；单击“确定”按钮进入编程界面。

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“exercise13.elt”（“随书光盘：\Chapter02\exercise13\uncompleted\exercise13.elt”）文件；单击“选择”按钮，选择“使用参考的模型 Model 坐标”选项；然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 2-308 所示。

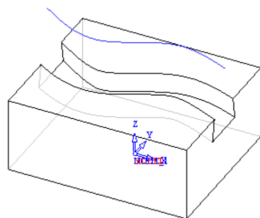


图 2-308　模型调入

3）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框，选择“BN10”刀具，如图 2-309 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



图 2-309　“刀具库”对话框

4）创建刀路轨迹。单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“5 轴”，安全平面 Z 为“100”，如图 2-310 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

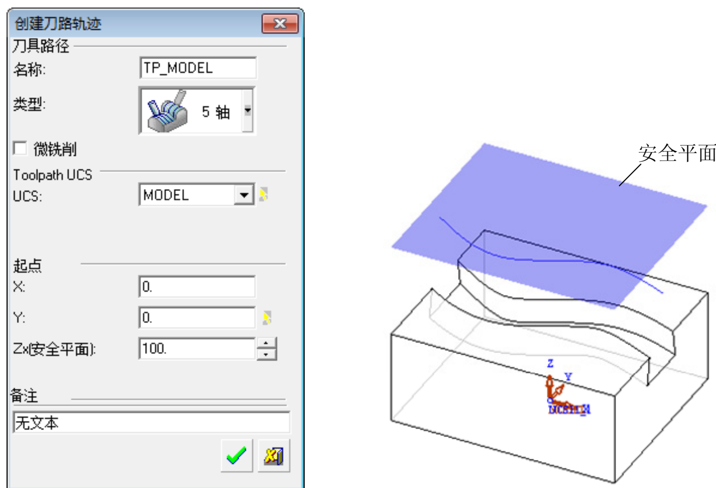


图 2-310　“创建刀路轨迹”对话框

5）创建毛坯。单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“限制盒”，如图 2-311 所示。单击确定按钮，完成毛坯的创建。

6）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 2-312 所示。



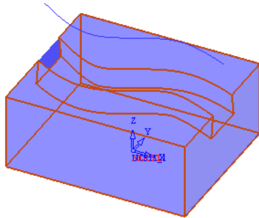


图 2-311 创建毛坯

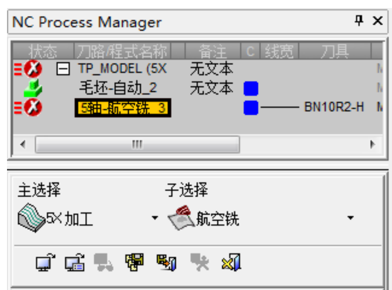


图 2-312 “NC Process Manager”对话框

7）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框，选择“工艺类型”为“两曲面之间仿形铣”，设置其他参数如图 2-313 所示。

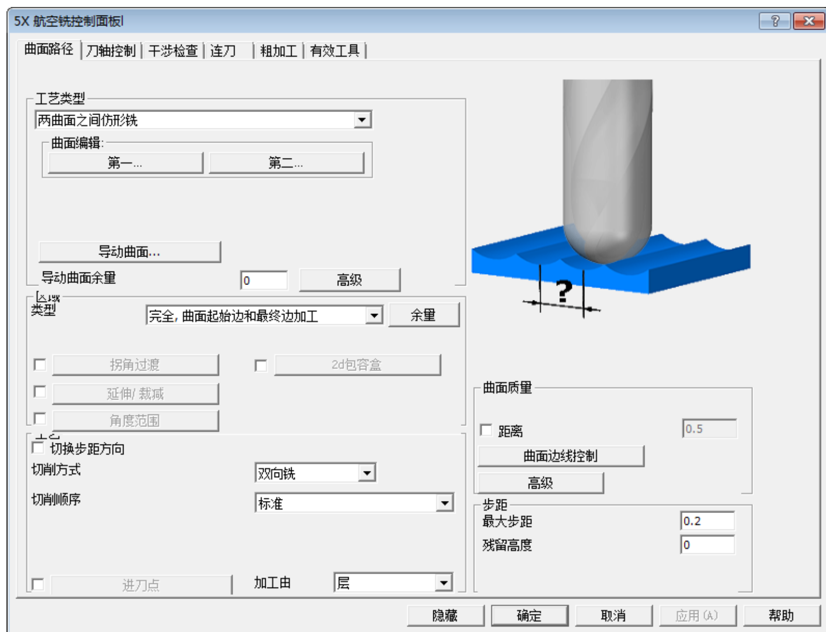


图 2-313 “5X 航空铣控制面板”对话框

- 在“曲面编辑”框中单击“第一”按钮，选择如图 2-314 所示的曲面为第一曲面，然后单击鼠标中间确定；单击“第二”按钮，选择如图 2-315 所示的曲面为第二曲面，然后单击鼠标中间确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。
- 在“曲面编辑”框中单击“导动曲面”按钮，选择如图 2-316 所示的曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

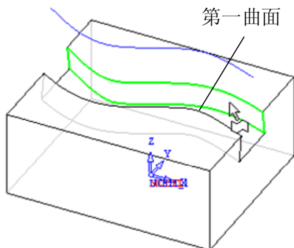


图 2-314　选择第一曲面

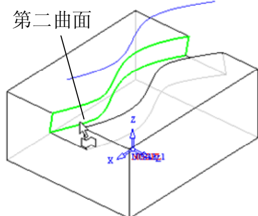


图 2-315　选择第二曲面

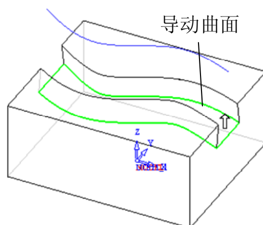


图 2-316　选择导动曲面

8）设置刀轴，具体操作步骤如下：

- 选择“刀轴控制”选项卡，选择“刀轴将”为“通过曲线倾斜”方式，设置“固定倾斜角度”为“5”，如图 2-317 所示。

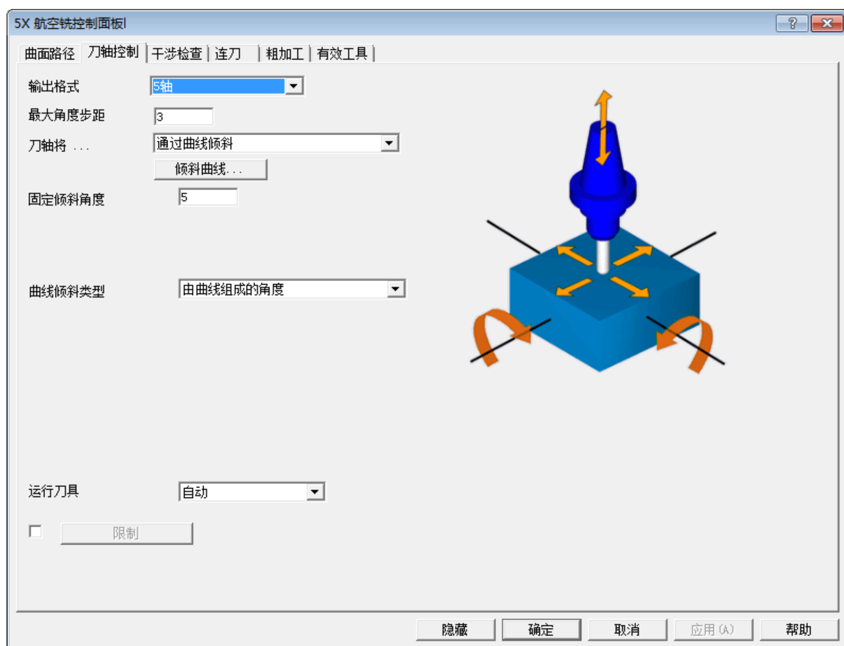


图 2-317　“刀轴控制”选项卡

- 单击“倾斜曲线”按钮，选择如图 2-318 所示的曲线作为倾斜曲线，然后单击鼠标中间确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

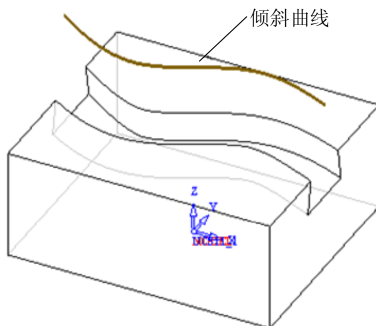


图 2-318　选择倾斜曲线

9）选择“连刀”选项卡，选择“小间隙”为“直接”，“大间隙”为“沿曲面”，设置其他参数如图 2-319 所示。

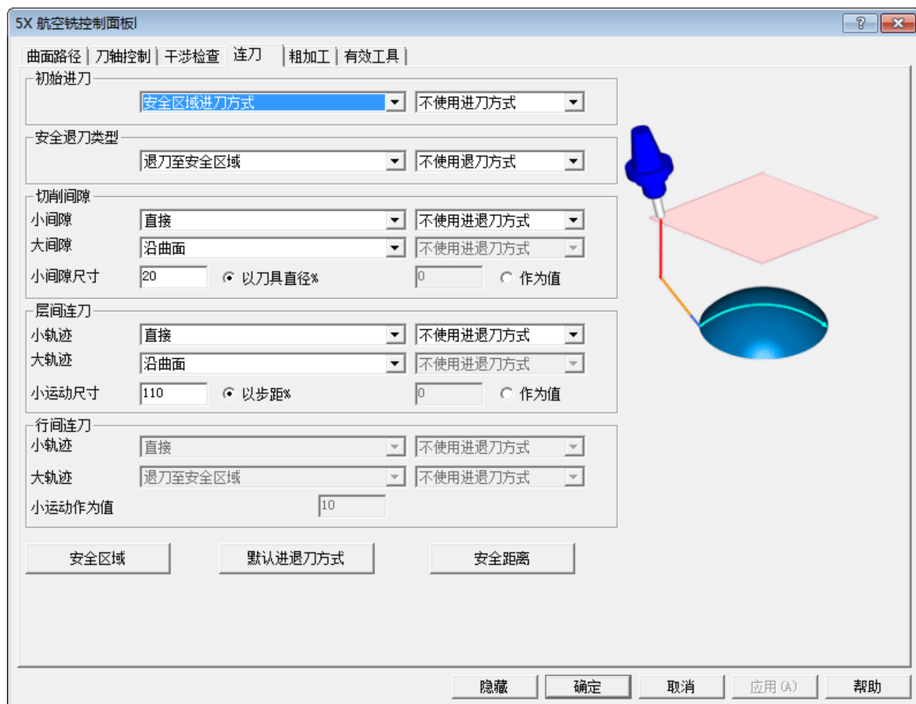


图 2-319　“连刀”选项卡

10）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 2-320 所示。

11）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中

的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-321 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	628.3185
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6500.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 2-320　设置机床参数

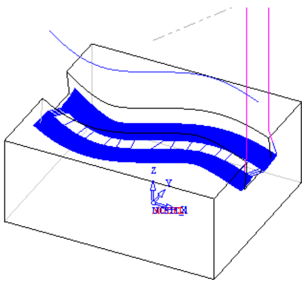


图 2-321　生成的刀具路径

2.3.2　五轴侧刃铣

五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削对倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件加工，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率，如图 2-322 所示。

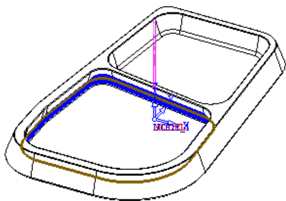


图 2-322　五轴侧刃铣

单击“刀具轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框，如图 2-323 所示。下面将主要介绍该对话框中最常用的选项参数的含义。

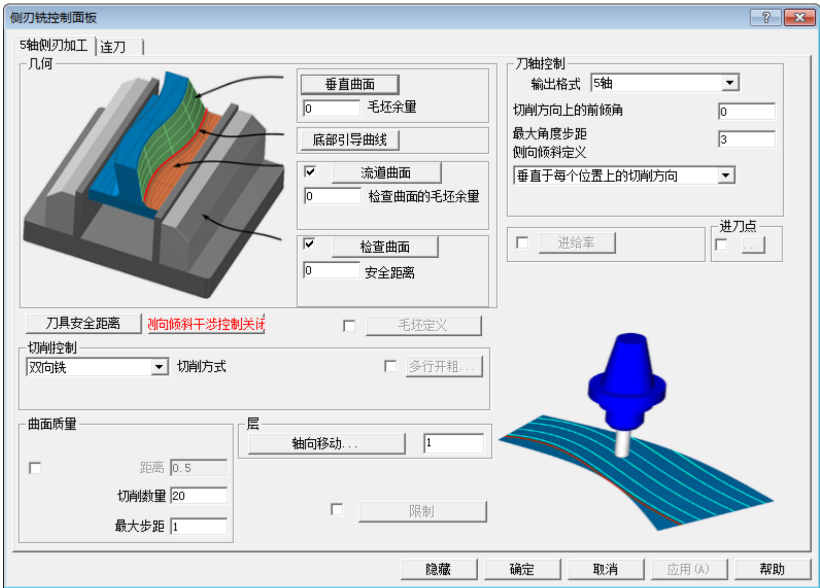


图 2-323　“侧刃铣控制面板”对话框

1）几何。几何用于设置侧刃加工刀具路径几何对象，包括以下选项：

- 【垂直曲面】：用于指定生成刀具路径的曲面。
- 【底部引导曲线】：用于指定控制刀轴运动的引导曲线。
- 【流道曲面】：用于指定与刀具刀尖接触并限制刀具路径边界的曲面。
- 【检查曲面】：用于指定刀具进行干涉检查的曲面，可选择夹具面作为检查曲面。

2）刀具安全距离。单击“刀具安全距离”按钮，弹出“刀具安全距离”对话框，如图 2-324 所示。利用该对话框可设置切削加工时刀具的安全区域。

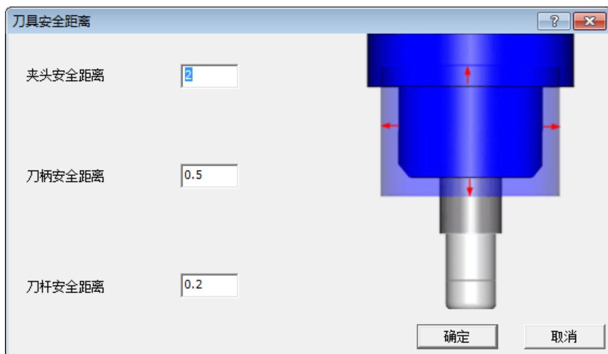


图 2-324 “刀具安全距离”对话框

3）多行开粗。多行开粗用于设置粗、精加工刀具路径之间的间距和行距等参数。勾选“多行开粗”复选框，单击“多行开粗”按钮，弹出“多行开粗”对话框，如图 2-325 所示。

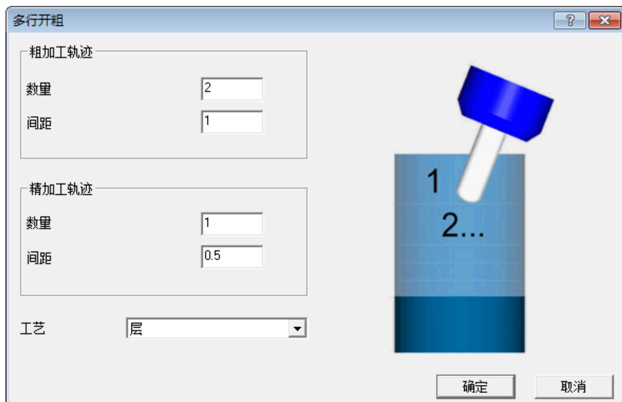


图 2-325 “多行开粗”对话框

4）曲面质量。曲面质量用于设置刀轨插补点距离和切削步距，包括以下选项：

- 【距离】：设置刀轨每个插补点之间的距离，如图 2-326 所示。
- 【切削数量】：设置轴向的刀轨数量，如图 2-327 所示。

- 【步距】：设置每条刀轨路径之间的距离。

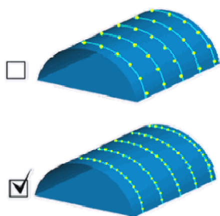


图 2-326　距离

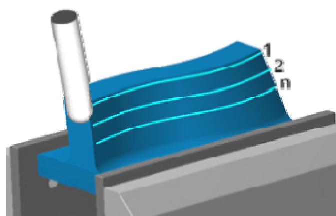


图 2-327　切削数量

5）轴向移动。轴向移动用于设置刀具路径在轴向的切削下界范围。

6）进给率。进给率用于设置刀具路径在不同位置的进给速度。勾选该复选框，单击“进给率”按钮，弹出“高级进给控制参数”对话框，如图 2-328 所示。

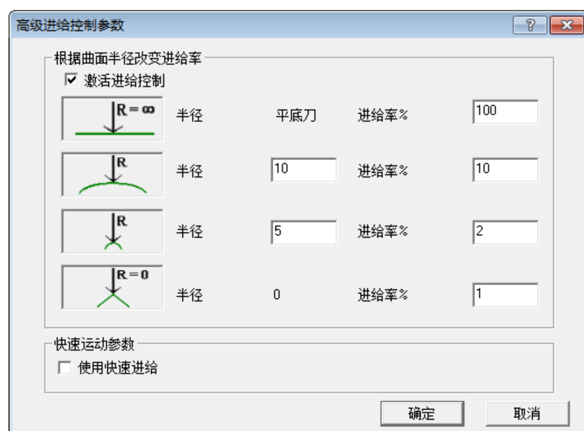


图 2-328　“高级进给控制参数”对话框

7）进刀点。进刀点用于设置加工区域刀具路径的起始点。勾选该复选框，单击“进刀点”按钮，弹出“进刀点参数”对话框，如图 2-329 所示。

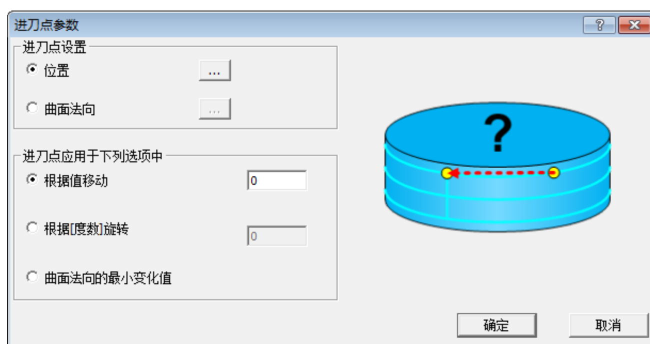


图 2-329　“进刀点参数”对话框

操作练习 14：五轴侧刃铣实例演练

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”；单击“确定”按钮进入编程界面。

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“exercise14.elt”（“随书光盘:\Chapter02\exercise14\uncompleted\exercise14.elt”）文件，单击“选择”按钮，选择“使用参考的模型 Model 坐标”选项；然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 2-330 所示。

3）创建刀具。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击 刀具库 按钮，弹出“刀具库”对话框选择“BN10”刀具，如图 2-331 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

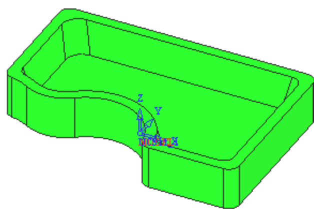


图 2-330　模型调入



图 2-331　“刀具库”对话框

4）创建刀路轨迹。单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“5 轴”，安全平面 Z 为“70”，如图 2-332 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

5）创建毛坯。单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“限制盒”，如图 2-333 所示。单击确定按钮，完成毛坯的创建。

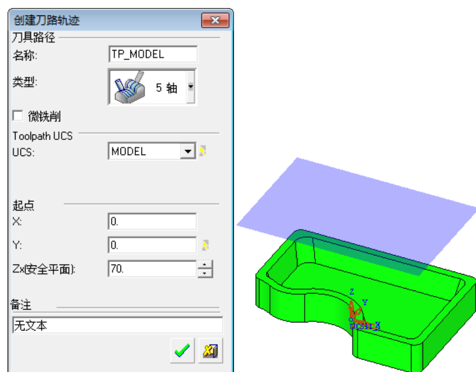


图 2-332　“创建刀路轨迹”对话框

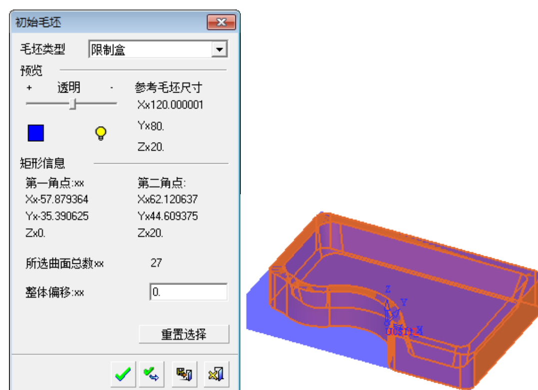


图 2-333　创建毛坯

6）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮 ，弹出“NC Process Manager”对话框，“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 2-334 所示。

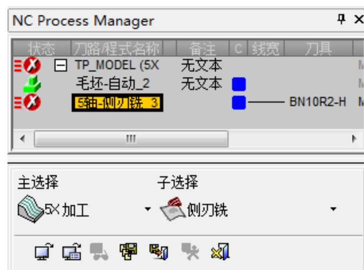


图 2-334　“NC Process Manager”对话框

7）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框，设置参数如图 2-335 所示。

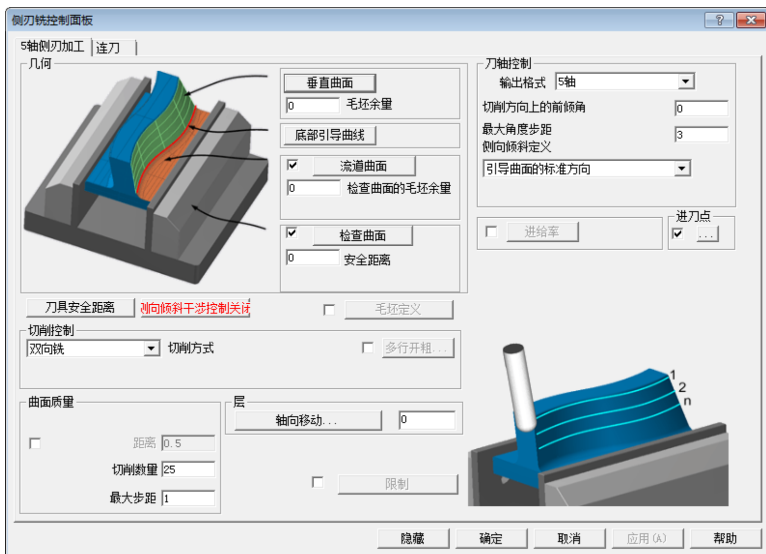
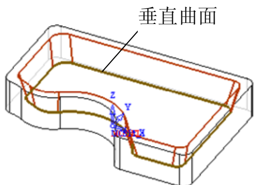
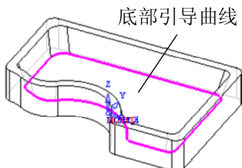


图 2-335 “侧刃铣控制面板”对话框

- 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 2-336 所示的曲面为垂直曲面；然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 2-337 所示的边线为底部引导曲线；然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中勾选“流道曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 2-338 所示的曲面为流道曲面；然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。





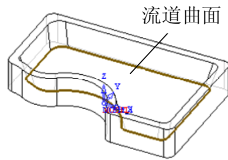


图 2-336 选择垂直曲面 图 2-337 选择底部引导曲线 图 2-338 选择流道曲面

- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 2-339 所示的曲面为检查曲面；然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框，如

图 2-340 所示。

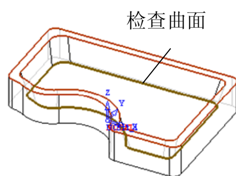


图 2-339　选择检查曲面

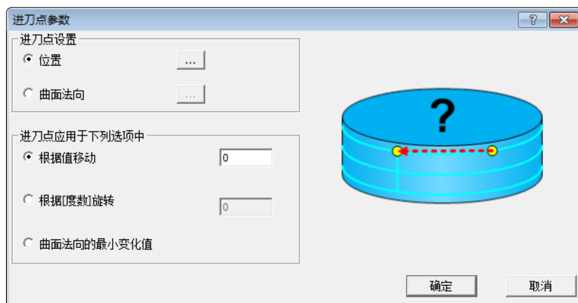


图 2-340　“进刀点参数”对话框

- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后…按钮，弹出“位置”对话框；单击…按钮选择如图 2-341 所示的位置为起点；单击鼠标中键确定，依次单击“确定”按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框。

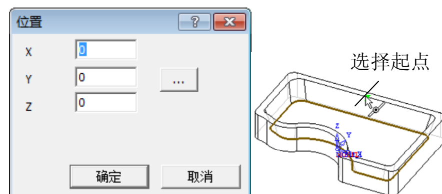


图 2-341　选择起点

- 选择“连刀”选项卡，设置相关参数如图 2-342 所示；单击“确定”按钮退出“侧刃铣控制面板”对话框。

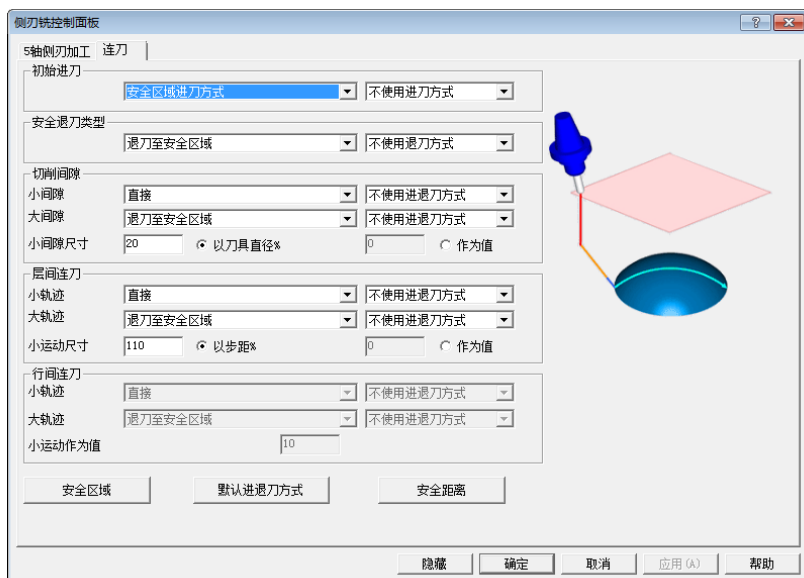


图 2-342　“连刀”选项卡

8）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 2-343 所示。

9）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 2-344 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	471.2389
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 2-343　设置机床参数

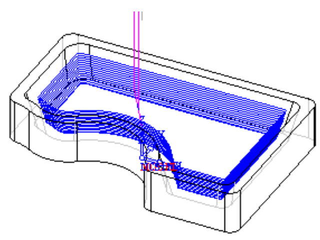


图 2-344　生成的刀具路径

2.4　本章小结

本章介绍了 Cimatron E9.0 三轴、四轴和五轴高速加工的基本知识，为了便于读者加深理解，本章讲解操作基础的同时，也安排了大量的操作练习范例。希望读者认真学习 Cimatron E9.0 各种加工策略以及相关选项参数的含义，为后面学习高速加工应用实例做好准备。

第 3 章　Cimatron E9.0 三轴高速加工实例

从本章开始讲解 Cimatron E9.0 高速加工应用实例。首先介绍三轴高速加工实例。数控三轴加工是最基本的多轴加工技术，三轴联动机床是多轴加工的标准配置，是通过控制系统控制 3 个轴（X、Y、Z）进行产品加工。本章按照由浅入深的原则，通过 3 个具体实例来讲解 Cimatron E9.0 在三轴高速加工中的应用。

3.1　入门实例——凸台零件高速加工

3.1.1　实例描述

凸台零件如图 3-1 所示。整个零件由水平表面、凸台上表面、凸台侧表面以及相互连接的圆角组成。材料为淬硬工具钢，表面粗糙度值为 *Ra*0.8 μm，工件底部安装在工作台上。

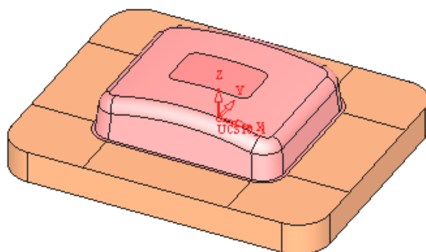


图 3-1　凸台零件

3.1.2　加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，凸台零件采用工艺路线为“粗加工”→“半精加工”→“精加工”→“清根加工”。凸台零件高速数控加工切削参数见表 3-1。

表 3-1　凸台零件高速数控加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
16	2	0.5	1.2	7850	1570	粗加工
8	2	-	0.4	15000	2180	半精加工
6	2	-	-	20000	2500	精加工
2	2	-	-	60000	4800	清根加工

1）粗加工。首先采用较大直径的刀具进行粗加工，以便去除大量多余留量。粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具为 *Φ*16mm、*R*4mm 的牛鼻刀。

2）半精加工。半精加工采用曲面铣精铣全部加工，通过半精加工可使各部分加工余量相对均匀，刀具为 Φ8mm 的球刀。

3）精加工。精加工采用曲面铣限制角度精铣方式，水平区域采用 3D 步距方式，垂直区域采用层切方式，刀具为 Φ6mm 的球刀。

4）清根加工。用清角方式加工前面加工留下的较多残料。清根加工采用刀具为 Φ2mm 的球刀和局部精细加工的清根铣方式。

3.1.3 加工流程与所用知识点

凸台零件数控加工具体的步骤和设计知识点，如表 3-2 所示。

表 3-2 凸台零件数控加工具体的步骤和设计知识点

步　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择合适的刀具	光杆长度 切削长度 直径
Step 3：创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	创建刀路轨迹 刀具路径 名称: TP_MODEL 类型: 3 轴 微铣削 Toolpath UCS UCS: MODEL 起点 X: 0. Y: 0. Z(安全平面): 40 备注 无文本

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 4：创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	
Step 5：创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6：体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	
Step7：曲面铣精铣全部半精加工	精铣全部是最常用的曲面精加工与半精加工程序，通过设置不同的走刀方式，它可以适用于各种曲面零件的加工	
Step8：曲面铣限制角度精加工水平区域	限制角度精铣将选择曲面加工部位进行陡峭检查，区分为水平区域和垂直区域，并对不同性质的区域采用不同的铣削加工方法	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step9：曲面铣限制角度精加工垂直区域	限制角度精铣将选择曲面加工部位进行陡峭检查，区分为水平区域和垂直区域，并对不同性质的区域采用不同的铣削加工方法	
Step10：局部精细清根加工	清根铣用于清除前一刀具路径残留的材料，通过设置刀路参数可区分加工区域范围	

3.1.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 3-2 所示。单击“确定”按钮，进入编程界面。

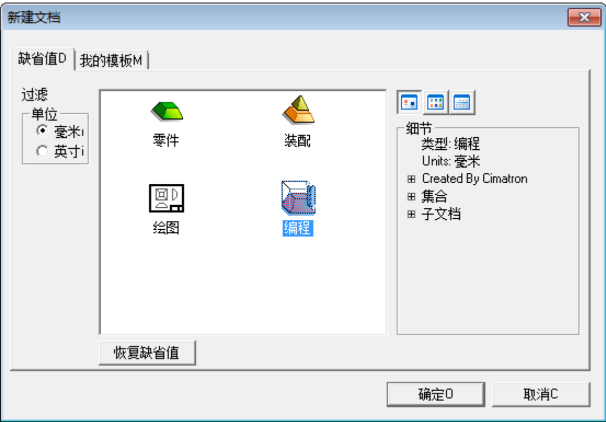


图 3-2　“新建文档”对话框

2）调入模型，具体操作步骤如下：

- 单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“tutai.elt”（“随书光盘：\Chapter03\3.1\uncompleted\tutai.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。
- 单击“Feature Guide”对话框“可选”栏中的“选择选项拾取参考”按钮，选择“根据坐标增量”选项，输入 Z 增量为“−40.0000”；然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 3-3 所示。

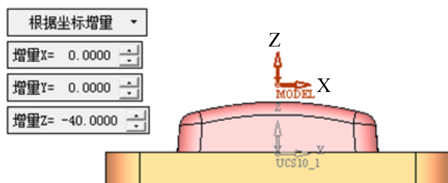


图 3-3　调入模型

2. 创建刀具

1）创建 D16R4 的牛鼻刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 3-4 所示。

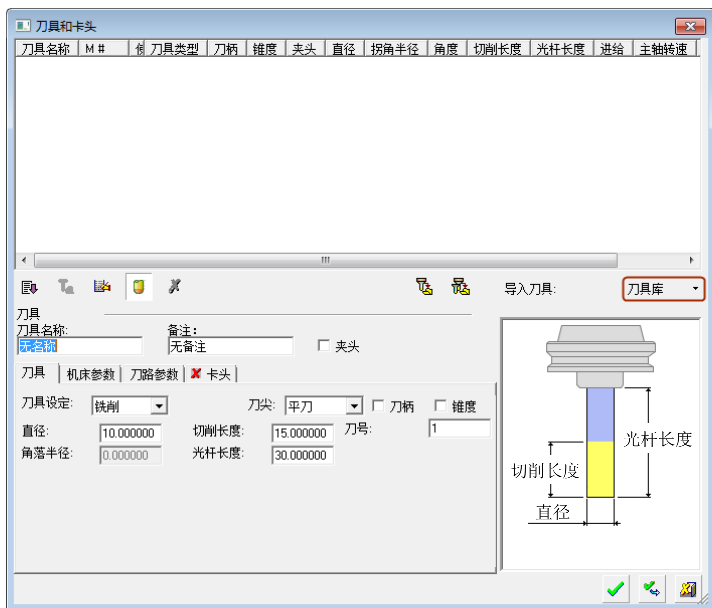


图 3-4　“刀具和卡头”对话框（1）

- 单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-5 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

2）创建 B8 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-6 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

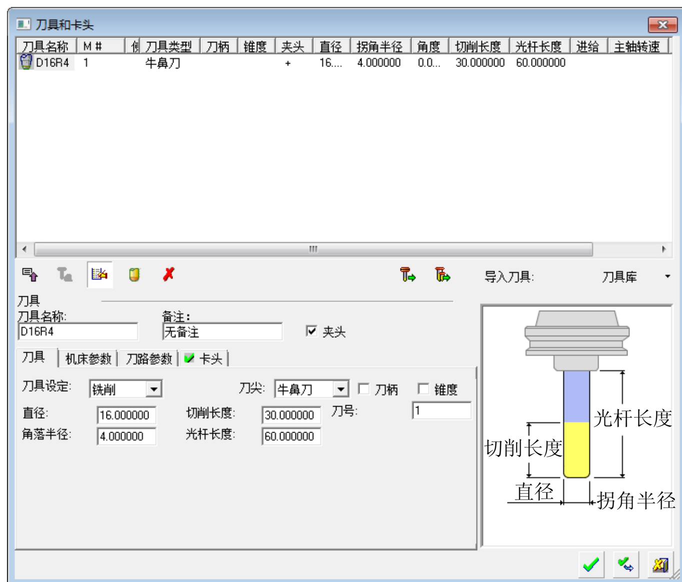


图 3-5　设置刀具参数

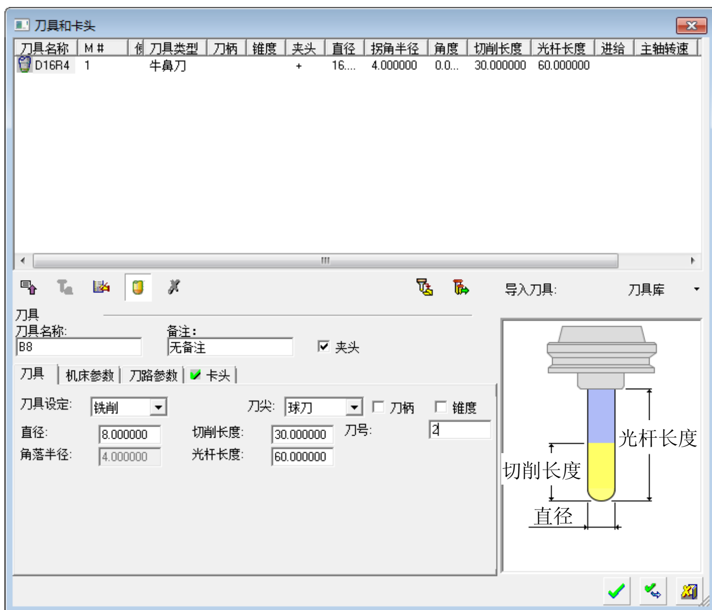


图 3-6　创建 B8 球刀

3）创建 B6 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-7 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

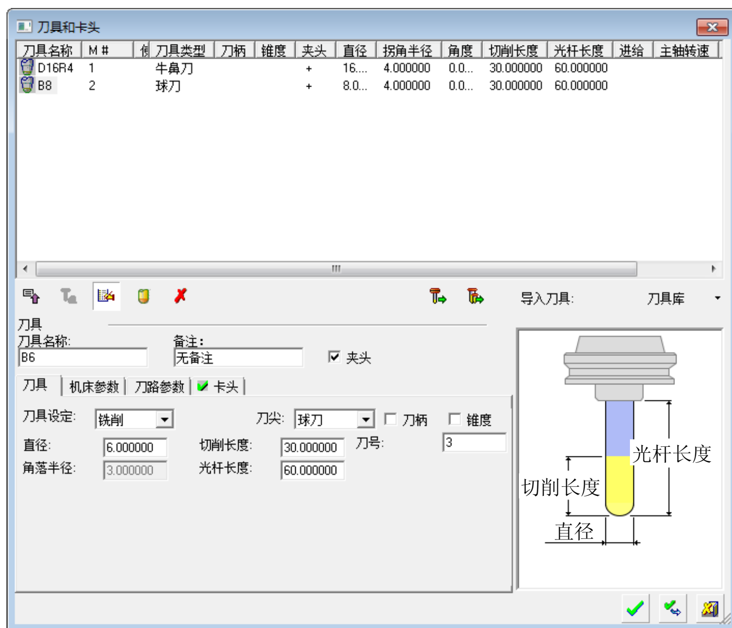


图 3-7　创建 B6 球刀

4）创建 B2 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-8 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

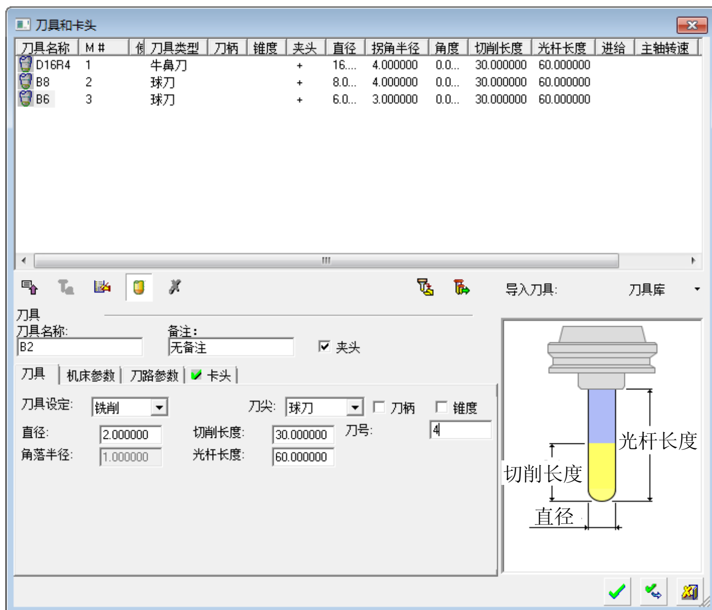


图 3-8　创建 B2 球刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“3 轴”，UCS 选择“MODEL”，安全平面 Z 为“40”，如图 3-9 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。



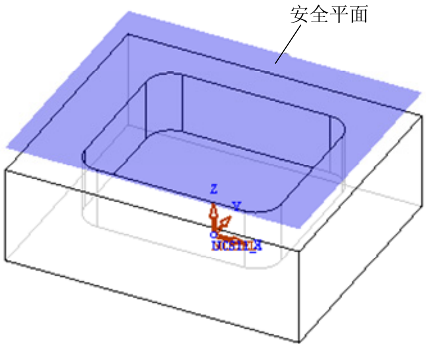


图 3-9 “创建刀路轨迹”对话框



注意

在高速铣加工中安全平面不要设置太大，否则空行程太大，影响加工效率和刀具寿命。

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮创建零件，如图 3-10 所示。



手动	规则	合计
37	0	37

	Xxx	Yxx	Zxx
Min.	-100.	-80.	-60.
最	100.	80.	-10.621
Ref.	200.	160.	49.379

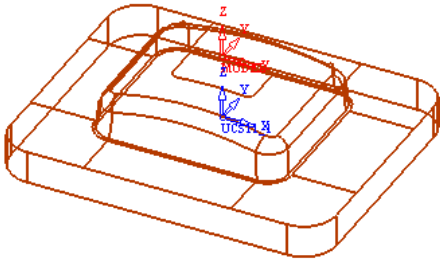


图 3-10 创建零件

5. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择图 3-11 所示的模型边线；单击鼠标中键返回，单击确定按钮，返回“初始毛坯”对话框。

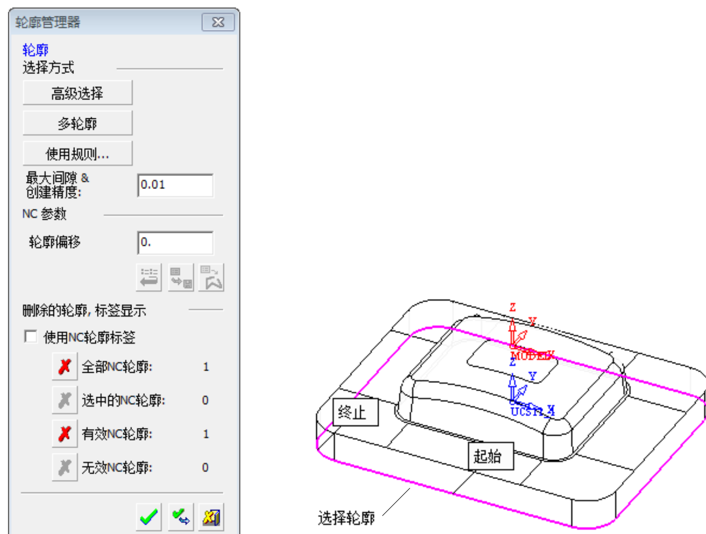


图 3-11　选择轮廓

2）在“Z-顶部”文本框中输入“0”，单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 3-12 所示。

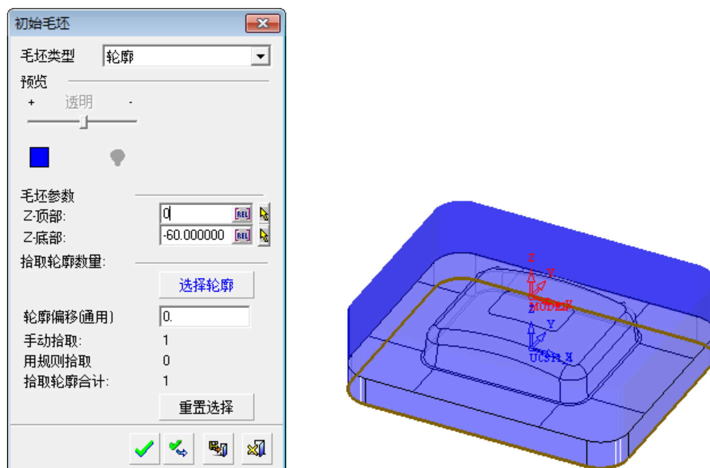


图 3-12　创建的毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 3-13 所示。

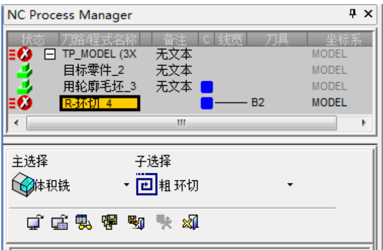


图 3-13 “NC Process Manager”对话框（1）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面，此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-14 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“37”，如图 3-15 所示。

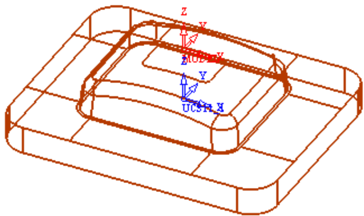
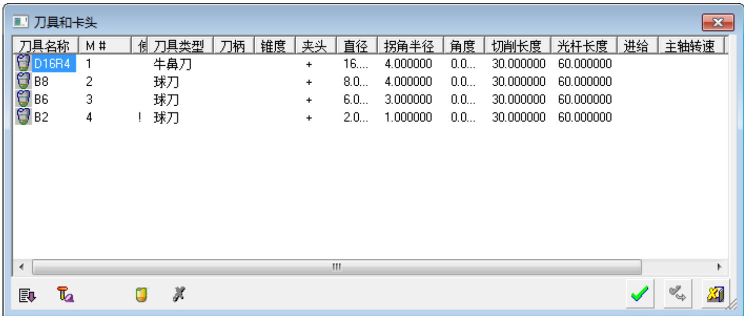


图 3-14 选择所有曲面（1）

零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	37

图 3-15 “零件”选项（1）

3）选择刀具。单击“刀具和卡头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D16R4 牛鼻刀，如图 3-16 所示。


刀具和卡头

刀具名称	M #	侧	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D16R4	1		牛鼻刀			+	16....	4.000000	0.0...	30.000000	60.000000		
B8	2		球刀			+	8.0...	4.000000	0.0...	30.000000	60.000000		
B6	3		球刀			+	6.0...	3.000000	0.0...	30.000000	60.000000		
B2	4	!	球刀			+	2.0...	1.000000	0.0...	30.000000	60.000000		

图 3-16 “刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-17 所示。

- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为 12，如图 3-18 所示。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	40.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 3-17　安全平面（1）

参数	值
⊟ 进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	12.0000
最小切削宽度	0.0200
最大螺旋半径	6.7200
螺纹铣	56.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-18　进刀和退刀点（1）



注意

“进刀角度”用于设置螺旋式下刀，进刀角度为 90° 表示垂直下刀，当进刀角度小于 90° 时，刀具将以螺旋方式切入材料。采用螺旋下刀有利于改善刀具插入时的切削负荷。

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.6000”，“曲面精度”为“0.010000”；其他参数如图 3-19 所示。

⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.6000
曲面精度	0.010000
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-19　精度和曲面偏移（1）

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”，“策略”为“用户定义”；取消“策略：毛坯环切”复选框；“固定垂直步进”为“0.5000”；“侧向步长”为“1.2”；选中“真环切”复选框，“加工由”为“区域”；其他参数如图 3-20 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 3-21 所示。

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	固定 + 水平面
固定垂直步进	0.5000
侧向步长	1.2
真环切	☑
从安全平面到固定	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留余量	0.1640

图 3-20　刀路轨迹参数（1）

⊟ 高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	1.2000
预设置的摆线半径	4.8000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	1.0000

图 3-21　高速铣（1）



注意

选中“摆线”方式可以在切削加工中使用摆线方式，有利于切削负荷的稳定。

- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”

选项；其他参数如图 3-22 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框；设置其他相关参数如图 3-23 所示。

清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000
有效范围半径	0.8400
最狭窄区域宽度	0.2400

图 3-22 清理行间间隙

机床参数	
Vc(米/分钟)	394.5840
主轴转速	7850
进给(毫米/分钟)	1570.0000
进刀速率（%）	300
切入进给速率(%)	100
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 3-23 设置机床参数（1）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-24 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的体积铣粗加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-25 所示。

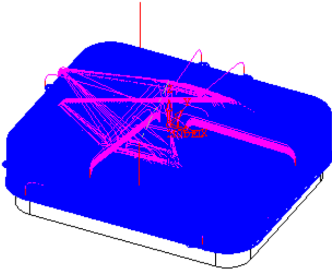


图 3-24 生成的刀具路径（1）

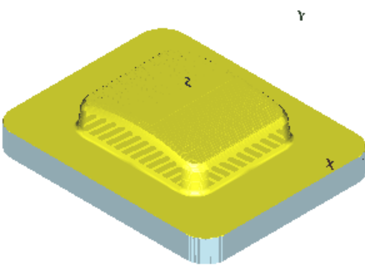


图 3-25 仿真模拟结果（1）

步骤三：曲面铣精铣全部半精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 3-26 所示。



图 3-26 “NC Process Manager”对话框（2）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显

示，如图 3-27 所示。

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“37”，如图 3-28 所示。

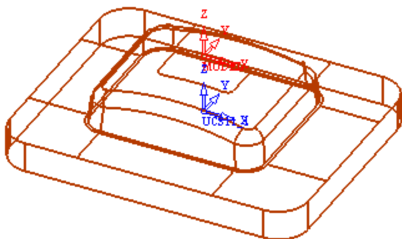
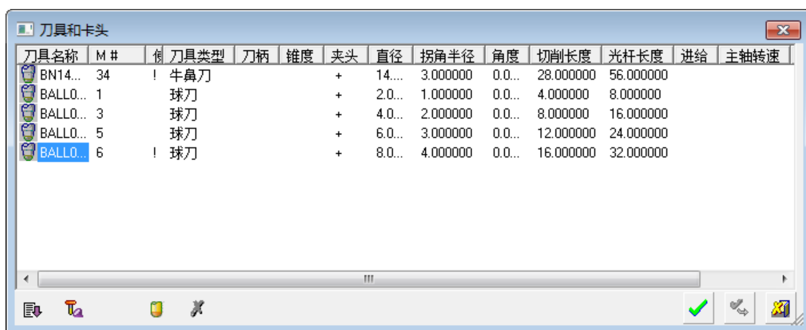


图 3-27　选择所有曲面（2）

零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	37
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-28　“零件”选项（2）

3）选择刀具。单击“刀具和卡头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B8 球刀，如图 3-29 所示。



刀具和卡头

刀具名称	M #		刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
BN14...	34	!	牛鼻刀			+	14....	3.000000	0.0...	28.000000	56.000000		
BALL0...	1		球刀			+	2.0...	1.000000	0.0...	4.000000	8.000000		
BALL0...	3		球刀			+	4.0...	2.000000	0.0...	8.000000	16.000000		
BALL0...	5		球刀			+	6.0...	3.000000	0.0...	12.000000	24.000000		
BALL0...	6	!	球刀			+	8.0...	4.000000	0.0...	16.000000	32.000000		

图 3-29　“刀具和卡头”对话框（3）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-30 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，选择“优化”方式，如图 3-31 所示。

参数	值
刀路参数	
安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	40.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 3-30　安全平面（2）

进刀和退刀点	优化
螺纹铣	32.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-31　进刀和退刀点（2）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-32 所示。

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“加工方式”为“3D 步距”，“3D 步距”为“0.4000”；其他参数如图 3-33 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-32　精度和曲面偏移（2）

刀路轨迹	
加工方式	3D步距
3D 切削方式	顺铣
3D 切削方向	由内向外
3D步距	0.4000

图 3-33　刀路轨迹参数（2）



注意

3D 步距与环切方式相似，但生成曲面上 3D 等步距；而环切生成水平面上等距刀轨。所有曲面斜度变化较大时，使用 3D 步距方式可以在零件加工表面获得较好的加工质量。3D 步距是最适合高速加工的加工方式。

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-34 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 3-35 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 3-34　高速铣（2）

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	376.9911
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	2180.0000
进刀速率（%）	300
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-35　设置机床参数（2）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-36 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-37 所示。

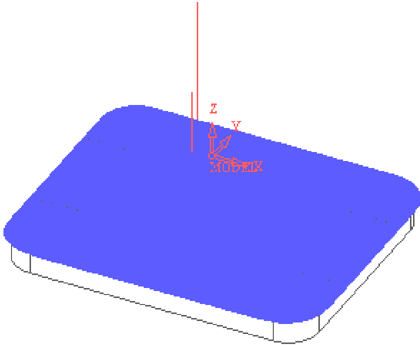


图 3-36　生成的刀具路径（2）

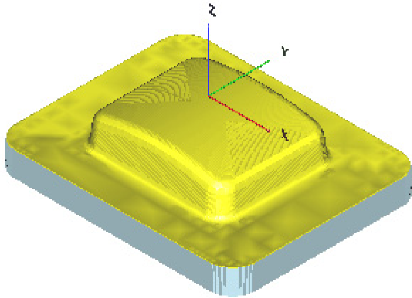


图 3-37　仿真模拟结果（2）

步骤四：曲面铣限制角度精加工水平区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“限制角度精铣”，如图 3-38 所示。

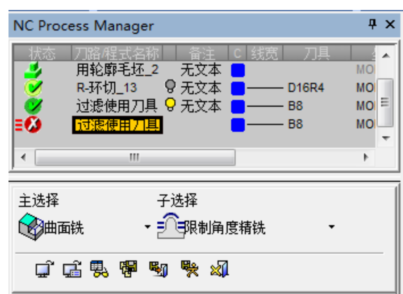


图 3-38 “NC Process Manager”对话框（3）

2)选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面，此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-39 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“37”，如图 3-40 所示。

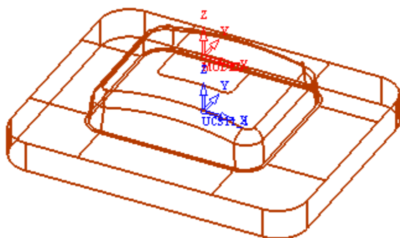


图 3-39　选择所有曲面（3）

零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	37
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-40 “零件”选项（3）

3）选择刀具。单击“刀具和卡头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B6 球刀，如图 3-41 所示。

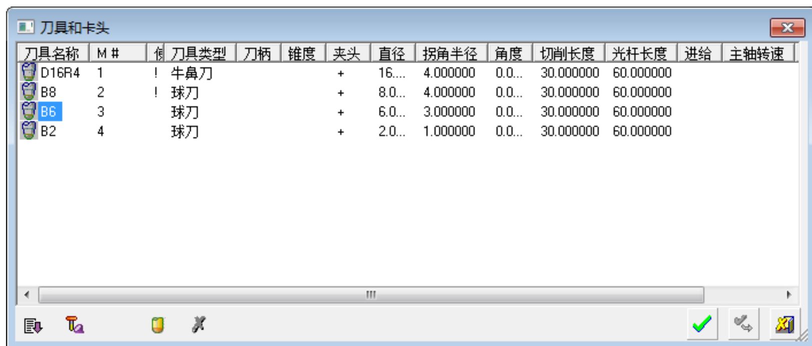


图 3-41 “刀具和卡头”对话框（4）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”，“曲

面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-42 所示。

- 展开“刀路轨迹”选项，选中“水平区域”复选框，取消“垂直区域”复选框，设置“水平加工方法”为“3D 步距”，“水平步距”为“0.2000”；其他参数如图 3-43 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-42　精度和曲面偏移（3）

参数	值
刀路轨迹	
水平区域	☑
水平加工方法	3D 步距 (H)
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由内向外
水平步距	0.2000
真环切	☑
垂直区域	☐
限制角度	70.0000

图 3-43　刀路轨迹参数（3）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“水平区域圆角”复选框；其他参数如图 3-44 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 3-45 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
水平区域圆角	☑
水平区域首选圆角	0.5000

图 3-44　高速铣（3）

机床参数	
Vc(米/分钟)	376.9911
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	2500
进刀速率（%）	300
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-45　设置机床参数（3）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-46 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-47 所示。

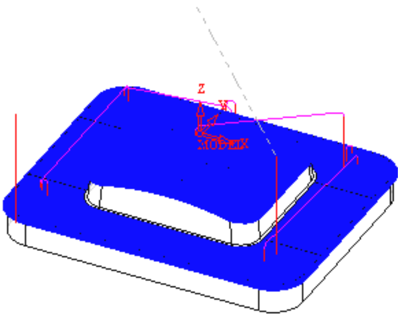


图 3-46　生成的刀具路径（3）

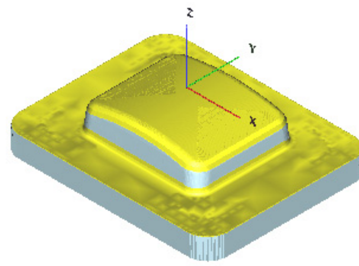


图 3-47　仿真模拟结果（3）

步骤五：曲面铣限制角度精加工垂直区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（4），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“限制角度精铣”，如图 3-48 所示。

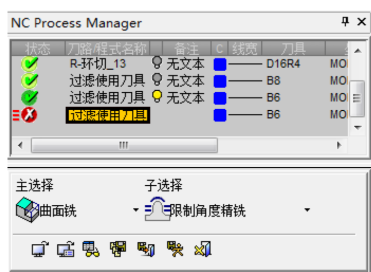


图 3-48　“NC Process Manager”对话框（4）

2）选择加工曲面和边界，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-49 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“37”，如图 3-50 所示。

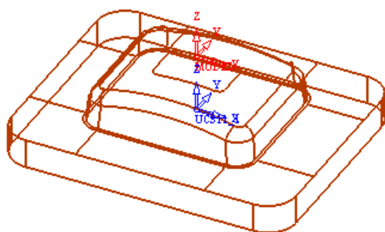


图 3-49　选择所有曲面（4）

零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	37
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-50　“零件”选项（4）

- 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，选择图 3-51 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。

3）设置加工参数。展开“刀路轨迹”选项，选中“垂直区域”复选框，取消“水平区域”复选框，设置“垂直加工策略”为“层”，“垂直步进”为“0.20000”；其他参数如图 3-52 所示。

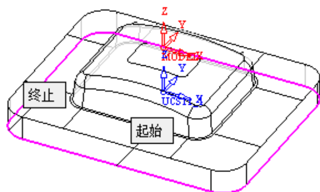


图 3-51　选择边界

参数	值
刀路轨迹	
水平区域	☐
垂直区域	☑
垂直加工策略	层
垂直区域切削方向	顺铣
垂直步进	0.20000
加工由	区域
限制角度	70.0000

图 3-52　刀路轨迹参数（4）

4）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-53 所示。

5）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的粗加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-54 所示。

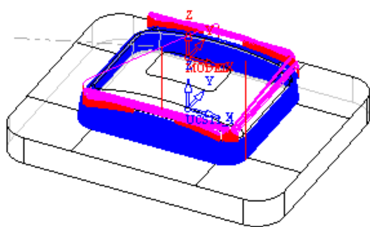


图 3-53 生成的刀具路径（4）

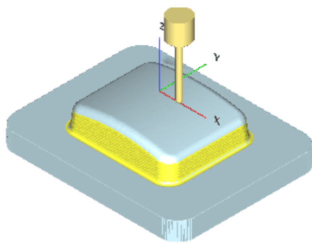


图 3-54 仿真模拟结果（4）



注意

Cimatron 能记忆上一个加工所设置的加工参数，故只需要设置本次加工所不同的加工参数即可。

步骤六：局部精细清根加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”（5）对话框，“主选择”为“局部精细加工”，“子选择”为“清根铣”，如图 3-55 所示。

2）选择刀具。单击“刀具和卡头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（5），选择 B2 球刀，如图 3-56 所示。

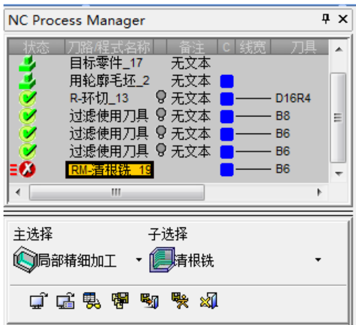


图 3-55 “NC Process Manager”对话框（5）

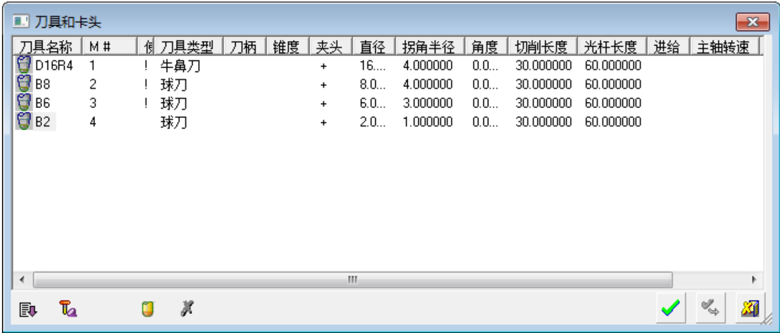


图 3-56 “刀具和卡头”对话框（5）

3）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-57 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，选中“切削方向”为“混合铣”，取消“二次开粗”复选框，设置“水平步距”为“0.0500”，“垂直步进”为“0.0100”，“前一把刀”为“B6”；其他参数如图 3-58 所示。

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间隙	0.0100

图 3-57　精度和曲面偏移（4）

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
二次开粗	☐
加工区域	分割水平/
水平步距	0.0500
减少刀路行数	☑
垂直步进	0.0100
前一把刀偏移	0.0000
前一把刀	B6

图 3-58　刀路轨迹参数（5）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-59 所示。

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 3-60 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 3-59　高速铣（4）

机床参数	
Vc(米/分钟)	376.9911
主轴转速	60000
进给(毫米/分钟)	4800.0000
进刀速率（%）	300
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-60　设置机床参数（4）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮[icon]，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-61 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮[icon]，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮[icon]；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-62 所示。

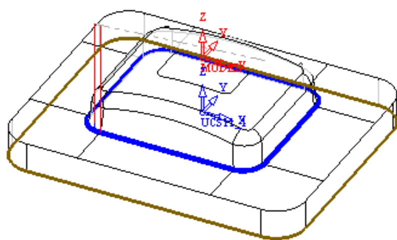


图 3-61　生成的刀具路径（5）

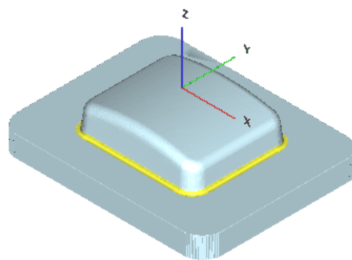


图 3-62　仿真模拟结果（5）

3.1.5 实例总结

本节以凸台零件为例讲解了运用 Cimatron E9.0 三轴高速加工的凸台零件铣加工方法和具体应用步骤。读者在学习过程中要注意的是：三轴高速加工粗加工常用的加工为体积铣；精加工采用曲面铣方式，同时设置“快速圆角连接”、“水平区域圆角”和“垂直区域圆角”来实现高速切削刀具平稳走刀。

3.2 提高实例——台灯灯罩凹模高速加工

3.2.1 实例描述

台灯灯罩凹模零件如图 3-63 所示。材料为高淬硬工具钢，表面粗糙度值为 $Ra0.8\mu m$，工件底部安装在工作台上。

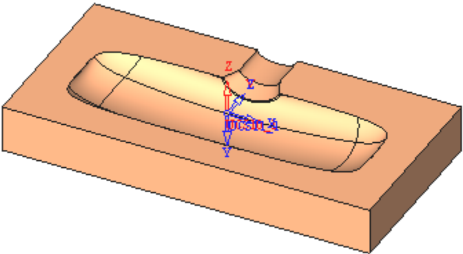


图 3-63 台灯灯罩凹模零件

3.2.2 加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，台灯灯罩凹模零件采用工艺路线为“粗加工”→“半精加工”→“精加工”。台灯灯罩凹模高速数控加工切削参数，见表 3-3。

表 3-3 台灯灯罩凹模高速数控加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
12	2	0.2～0.5	0.7	15000	6500	粗加工
8	2	-	0.3	25000	7000	半精加工
6	2	-	-	30000	8000	精加工

1）粗加工。首先采用较大直径的刀具进行粗加工，以便去除大量多余留量，粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具为 Φ12mm、R2mm 的牛鼻刀。

2）半精加工。半精加工采用曲面铣精铣全部加工，通过半精加工可使各部分加工余量相对均匀，刀具为 Φ8mm 的球刀。

3）精加工。对水平区域采用精铣、环切方式、顺铣加工。对凹腔区域采用曲面铣精铣全部，通过设置加工边界来限制加工区域，采用 3D 步距方式，刀具为 Φ6mm 的球刀。

3.2.3　加工流程与所用知识点

台灯灯罩凹模数控加工具体的步骤和设计知识点，如表 3-4 所示。

表 3-4　台灯灯罩凹模数控加工具体的步骤和设计知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要，选择适用的刀具	
Step 3：创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	
Step 4：创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 5：创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6：体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	
Step7：曲面铣精铣全部半精加工	精铣全部，是最常用的曲面精加工与半精加工程序，通过设置不同的走刀方式，它可以适用于各种曲面零件的加工	
Step8：曲面铣精铣水平区域加工分型面	精铣水平区域用于精加工水平面，生成的刀具路径只加工在同一水平面的曲面加工区域	
Step9：曲面铣精铣全部精加工凹腔	精铣全部，是最常用的曲面精加工与半精加工程序，通过设置不同的走刀方式，它可以适用于各种曲面零件的加工	

3.2.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1. **进入编程模块，导入 CAD 模型文件**

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 3-64 所示。单击“确定”按钮，进入编程界面。



图 3-64　“新建文档”对话框

2）调入模型，具体操作步骤如下：

- 单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“dengzhao.elt”（“随书光盘：\Chapter03\3.2\uncompleted\dengzhao.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。
- 单击“Feature Guide”对话框“可选”栏中的“选择选项拾取参考”按钮，选择“根据坐标增量”选项，输入 Z 增量为“-5.0000”；然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 3-65 所示。



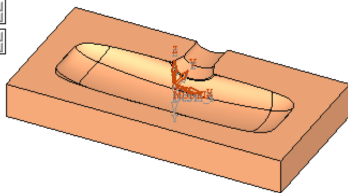


图 3-65　调入模型

2. **创建刀具**

1）创建 D12R2 的牛鼻刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 3-66 所示。

● 单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-67 所示。依次单击确定按钮✓，完成刀具创建。

图 3-66 “刀具和卡头”对话框（1）

图 3-67 “刀具库”对话框

2）创建 B8 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-68 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

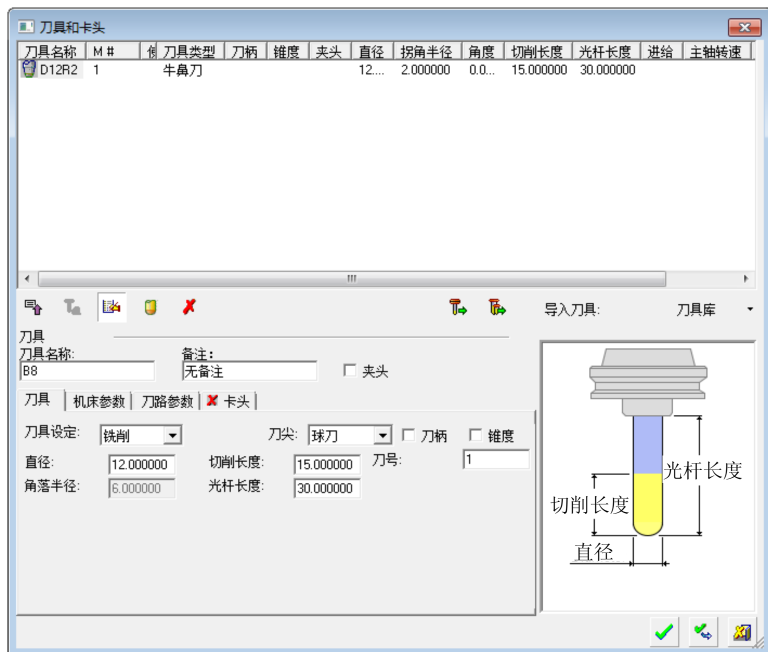


图 3-68　创建 B8 球刀

3）创建 B6 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-69 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。



注意

Cimatron E9.0 提供刀具主要有球刀、牛鼻刀、平底刀等，在高速加工中尽可能不用平底刀。

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径“类型”为“3 轴”，“UCS”选择“MODEL”，安全平面 Z 为“50”，如图 3-70 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

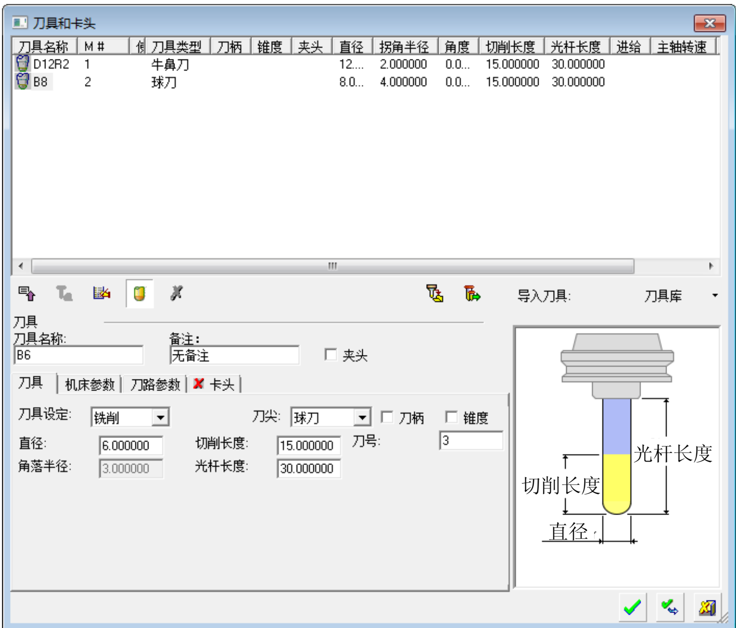


图 3-69 创建 B6 球刀



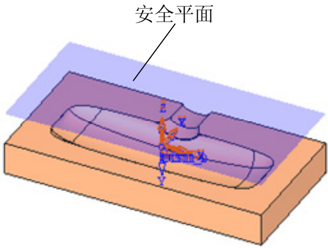


图 3-70 “创建刀路轨迹”对话框



注意

刀路轨迹用于定义刀具路径的名称、加工类型和方式、机床坐标系、刀具路径起点、安全平面等参数。

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮创建零件，如图 3-71 所示。



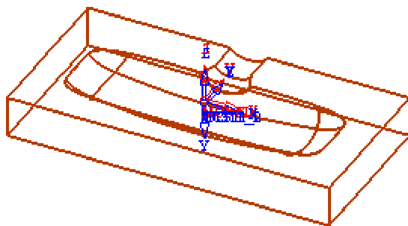


图 3-71　创建零件


注意

创建零件不是必须的，当有创建零件时，就可以进行快速验证及分析切削预留量。加工简单模型时，可以不需要设置，但加工复杂模型时，最好予以设置，并在后面进行快速验证比较。

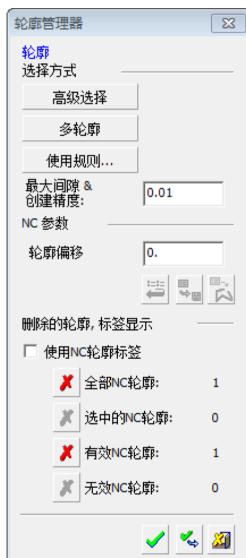
5. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择图 3-72 所示的模型边线；单击鼠标中键返回，单击确定按钮，返回“初始毛坯”对话框。

2）在“Z-顶部”文本框中输入“0.000000”，“Z-底部”为“ −55.000000”，单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 3-73 所示。


注意

毛坯创建方法有曲面、轮廓、矩形、限制盒、从文件等多种方法，其中“轮廓”是根据选择轮廓和指定 Z 值生成毛坯。



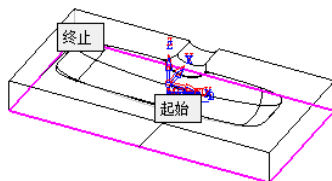


图 3-72　选择轮廓



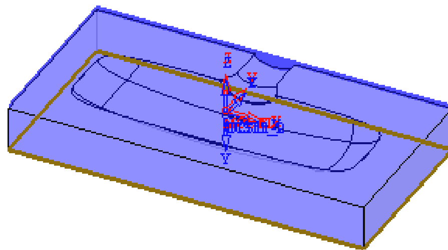


图 3-73　创建的毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 3-74 所示。

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

● 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-75 所示。

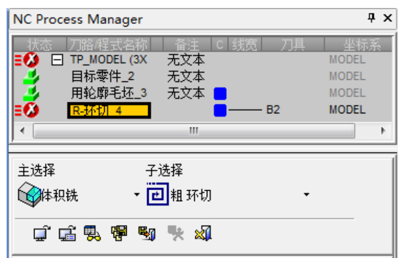


图 3-74 “NC Process Manager”对话框（1）

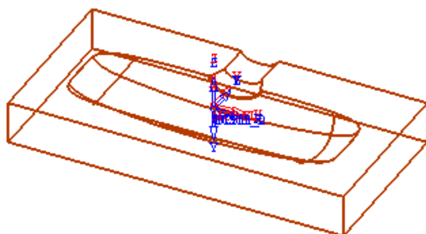


图 3-75 选择所有曲面（1）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框；在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“24”，如图 3-76 所示。

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	24

图 3-76 “零件”选项（1）

3）选择刀具。单击“刀具和卡头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D12 R2 牛鼻刀，如图 3-77 所示。

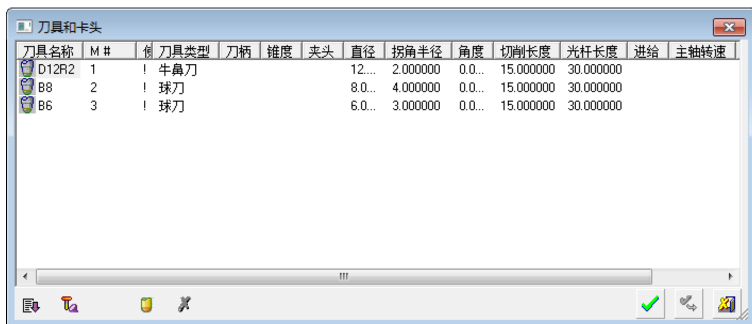


图 3-77 “刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-78 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“15.0000”，如图 3-79 所示。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	50.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 3-78 安全平面（1）

⊟ 进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	15.0000
最小切削宽度	0.0200
最大螺旋半径	5.7600
螺纹铣	48.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-79 进刀和退刀点（1）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.6”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-80 所示。



注意

粗加工中可设置“曲面精度”略大一些，以提高加工效率。

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”、“策略”为“用户定义”，取消“策略：毛坯环切”复选框，设置“垂直步进类型”为“可变”、“侧向步长”为“0.7000”，选中“真环切”复选框、“加工由”为“区域”；其他参数如图 3-81 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.6
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间隙	0.0100

图 3-80　精度和曲面偏移（1）

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	可变
最大垂直步进	0.5000
最小垂直步进	0.2000
侧向步长	0.7000
真环切	☑
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留余量	0.6

图 3-81　刀路轨迹参数（1）



注意

“半精轨迹”是指在粗加工的最后一圈针对零件侧壁进行加工，以保证周边所留余量均匀。

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 3-82 所示。



注意

角部圆角连接可以避免在加工角部产生突变的切削进给方向，从而保持刀具运动轨迹的光滑与平稳，避免刀具切削方向的突然变化。

- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项；其他参数如图 3-83 所示。

高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	0.7000
预设置的摆线半径	3.6000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.8000

图 3-82　高速铣（1）

清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000
有效范围半径	0.8400
最狭窄区域宽度	0.2400

图 3-83　清理行间间隙

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 3-84 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	565.4867
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	6500.0000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-84　设置机床参数（1）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-85 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工；单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-86 所示。

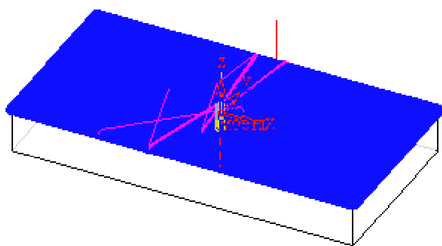


图 3-85　生成的刀具路径（1）

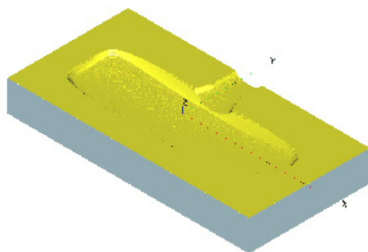


图 3-86　仿真模拟结果（1）

步骤三：曲面铣精铣全部半精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 3-87 所示。

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-88 所示。

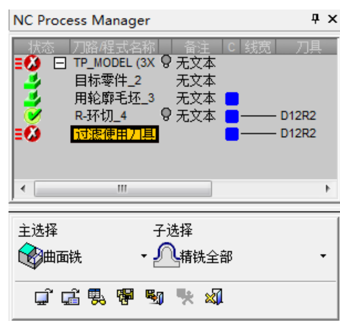


图 3-87　“NC Process Manager”对话框（2）

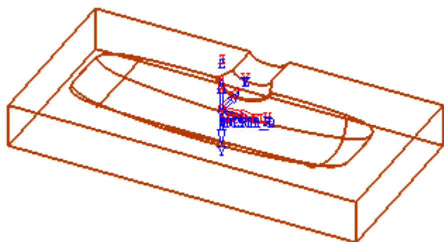


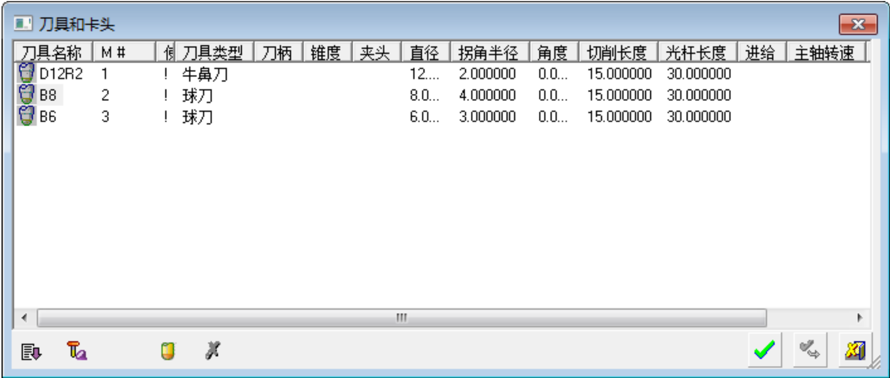
图 3-88　选择所有曲面（2）

● 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“24”，如图 3-89 所示。

参数	值
⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	24
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-89 “零件”选项（2）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B8 球刀，如图 3-90 所示。



刀具名称	M #	侧	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D12R2	1	!	牛鼻刀				12....	2.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B8	2	!	球刀				8.0...	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B6	3	!	球刀				6.0...	3.000000	0.0...	15.000000	30.000000		

图 3-90 “刀具和卡头”对话框（3）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-91 所示。

参数	值
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	50.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 3-91 安全平面（2）



注意

“内部安全高度”采用“优化”方式，刀具提刀高度是根据当前刀具路径轨迹高度来决定的；可以减少提刀的高度，从而提高加工效率，但设置时要注意避免撞刀，所以在完成刀具路径计算后，一定要进行检查。

● 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，选择“优化”方式，如图 3-92 所示。

参数	值
⊟ 进刀和退刀点	优化
螺纹铣	32.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-92 进刀和退刀点（2）

● 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-93 所示。

● 展开“刀路轨迹”选项，设置“加工方式”为“3D 步距”，“3D 步距”为“0.3”；其他参数如图 3-93 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	3D步距
3D 切削方式	顺铣
3D 切削方向	由外向内
3D步距	0.3

图 3-93　精度和曲面偏移（2）与刀路轨迹参数（2）

● 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-94 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 3-94　高速铣（2）



注意

快速圆角连接设置非切削运动时，进行快速进给的转角部分运动路径，移动速度非常快，如果采用直接转向的方式，对机床会提出很高的要求。设置快速圆角连接，将尖角变成圆角过渡方式，从而保证进给速度。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 3-95 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	628.3185
主轴转速	25000
进给(毫米/分钟)	7000.0000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-95　设置机床参数（2）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-96 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工；单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-97 所示。

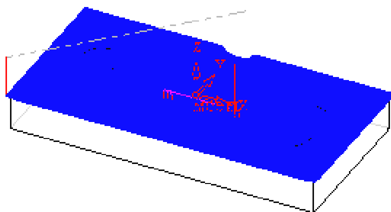


图 3-96　生成的刀具路径（2）

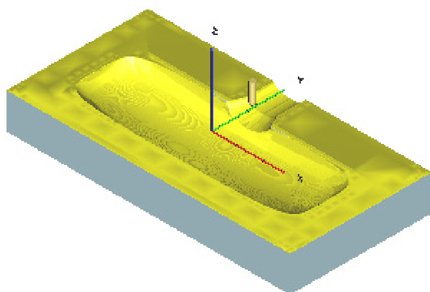


图 3-97　仿真模拟结果（2）

步骤四：曲面铣精铣水平区域加工分型面

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣水平区域”，如图 3-98 所示。

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

● 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-99 所示。

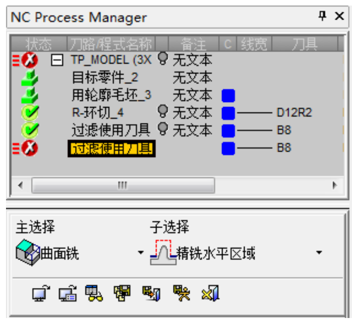


图 3-98 “NC Process Manager”对话框（3）

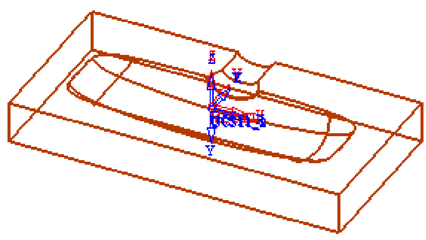


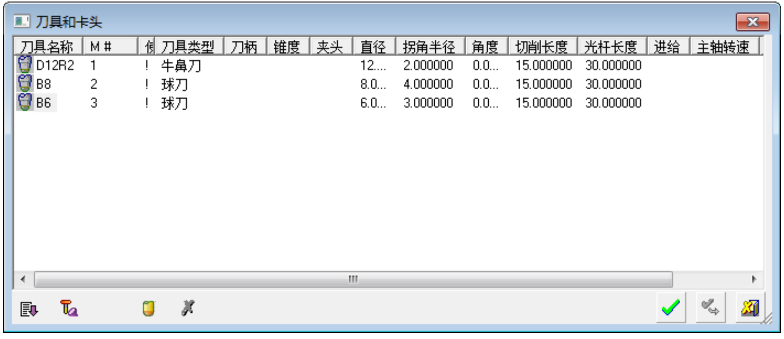
图 3-99 选择所有曲面（3）

● 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“24”，如图 3-100 所示。

零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	24
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-100 “零件”选项（3）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B6 球刀，如图 3-101 所示。



刀具和卡头

刀具名称	M #	偏	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D12R2	1	!	牛鼻刀				12....	2.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B8	2	!	球刀				8.0...	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B6	3	!	球刀				6.0...	3.000000	0.0...	15.000000	30.000000		

图 3-101 “刀具和卡头”对话框（4）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”，“曲面精度”为“0.005”；其他参数如图 3-102 所示。

● 展开“刀路轨迹”选项，选择“水平加工方法”为“环切”，“水平区域切削方向”为“顺铣”，设置“水平步距”为“0.25”，勾选“真环切”复选框；其他参数如图 3-103 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.005
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-102　精度和曲面偏移（3）

参数	值
刀路轨迹	
水平加工方法	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由外向内
水平步距	0.25
真环切	☑

图 3-103　刀路轨迹参数（3）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 3-104 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 3-105 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000

图 3-104　高速铣（3）

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	565.4867
主轴转速	30000
进给(毫米/分钟)	8000.0000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-105　设置机床参数（3）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-106 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-107 所示。

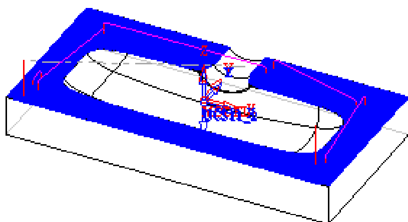


图 3-106　生成的刀具路径（3）

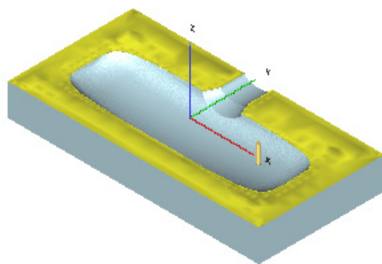


图 3-107　仿真模拟结果（3）

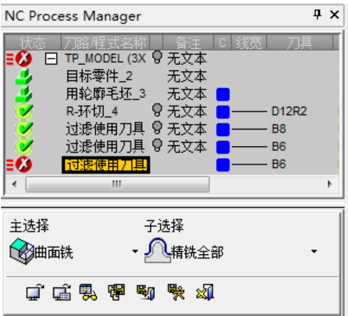
步骤五：曲面铣精铣全部精加工凹腔区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（4），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 3-108 所示。

2）选择加工曲面和边界，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏

上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-109 所示。



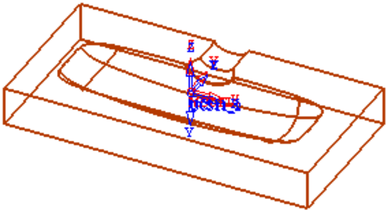
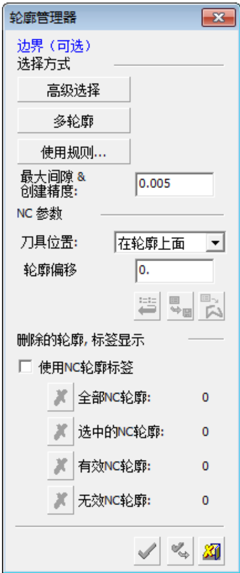


图 3-108 “NC Process Manager”对话框（4）　　图 3-109 选择所有曲面（4）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“24”，如图 3-110 所示。
- 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置“最大间隙&创建精度”为“0.005”，“刀具位置”为“在轮廓上面”，选择图 3-111 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。

参数	值
零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	24
检查曲面组数量	1
检查曲面	0



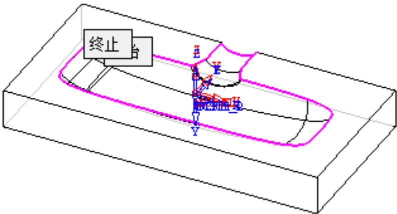


图 3-110 “零件”选项（4）　　图 3-111 选择边界

3）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”，“曲

面精度”为“0.005”；其他参数如图 3-112 所示。

- 展开“刀路轨迹”选项，选择“加工方式”为“3D 步距”，设置“3D 切削方式”为“顺铣”，“3D 步距”为“0.1000”；其他参数如图 3-113 所示。

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.0050
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-112　精度和曲面偏移（4）

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	3D步距
3D 切削方式	顺铣
3D 切削方向	由外向内
3D步距	0.1000

图 3-113　刀路轨迹参数（4）

4）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 3-114 所示。

5）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-115 所示。

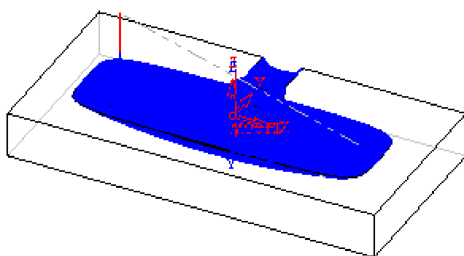


图 3-114　生成的刀具路径（4）

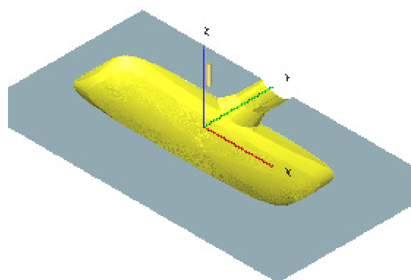


图 3-115　仿真模拟结果（4）

3.2.5　实例总结

本节讲解了台灯灯罩凹模 Cimatron E9.0 高速铣加工的方法和具体过程，读者在学习过程中要注意的是：对于凹模零件中平面分型面可采用曲面铣精铣水平区域方法加工；当曲面比较平缓时，区域凹腔区域可采用曲面铣精铣全部精加工或者采用曲面铣限制角度精铣加工。

3.3　经典实例——按摩器外壳模具高速加工

3.3.1　实例描述

按摩器外壳模具零件如图 3-116 所示。材料为高淬硬工具钢，表面粗糙度值

为 *Ra*0.8μm，工件底部安装在工作台上。

3.3.2 加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，按摩器外壳模具采用工艺路线为“粗加工”→“半精加工”→“精加工”→“清根加工”。按摩器外壳模具高速数控加工中所用到的切削参数，见表 3-5。

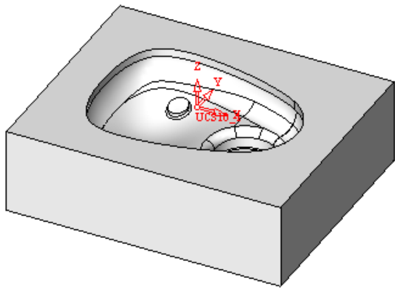


图 3-116 按摩器外壳模具

表 3-5 按摩器外壳模具加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
16	2	0.3～0.6	1.0	12000	4000	粗加工
10	2	0.15	0.6	20000	6000	二次开粗
8	2	—	0.3	25000	7000	半精加工
6	2	—	—	35000	8500	精加工
2	2	—	—	60000	8400	清根加工

1）粗加工。首先采用较大直径的刀具进行粗加工，以便去除大量多余留量。粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具为 *Φ*16mm、*R*4mm 的牛鼻刀。此外，采用 *Φ*10mm 的球刀，利用体积铣环切方法进行二次开粗加工，进一步均匀局部部位的余量。

2）半精加工。半精加工采用曲面铣精铣全部加工，通过半精加工可使各部分加工余量相对均匀，刀具为 *Φ*8mm 的球刀。

3）精加工。对水平区域采用精铣水平区域、环切方式、顺铣加工。对凹腔区域采用曲面铣精铣全部，通过设置加工边界来限制加工区域，采用 3D 步距方式，刀具为 *Φ*6mm 的球刀。

4）清根加工。用清角方式加工由前面加工留下的较多残料，清根加工采用刀具为 *Φ*2mm 的球刀，利用局部精细加工的清根铣方式进行。

3.3.3 加工流程与所用知识点

按摩器外壳模具数控加工具体的步骤和设计知识点，如表 3-6 所示。

表 3-6　按摩器外壳模具数控加工具体的步骤和设计知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择合适的刀具	光杆长度 切削长度 直径
Step 3：创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	创建刀路轨迹 刀具路径 名称: TP_MODEL 类型: 3 轴 微铣削 Toolpath UCS UCS: MODEL 起点 X: 0. Y: 0. Z(安全平面): 45. 备注 无文本
Step 4：创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 5：创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6：体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	
Step7：体积铣粗环切二次开粗加工	利用体积块粗环切实现工件二次开粗加工	
Step8：曲面铣精铣全部半精加工	精铣全部是最常用的曲面精加工与半精加工程序，通过设置不同的走刀方式，它可以适用于各种曲面零件的加工	
Step9：曲面铣精铣全部精加工凹腔	精铣全部是最常用的曲面精加工与半精加工程序，通过设置不同的走刀方式，它可以适用于各种曲面零件的加工	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step10：曲面铣精铣水平区域加工分型面	精铣水平区域用于精加工水平面，生成的刀具路径只加工在同一水平面的曲面加工区域	
Step11：局部精细清根加工	清根铣用于清除前一刀具路径残留的材料，通过设置刀路参数可区分加工区域范围	

3.3.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 3-117 所示。单击“确定”按钮，进入编程界面。

2）调入模型，具体操作步骤如下：

- 单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“anmoqi.elt”（“随书光盘：\Chapter03\3.3\uncompleted\anmoqi.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。
- 单击“Feature Guide”对话框“可选”栏中的“选择选项拾取参考”按钮，选择“根据坐标增量”选项，输入 Z 增量为“−5.0000”；然后单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 3-118 所示。

2．创建刀具

1）创建 D16R4 的牛鼻刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 3-119 所示。

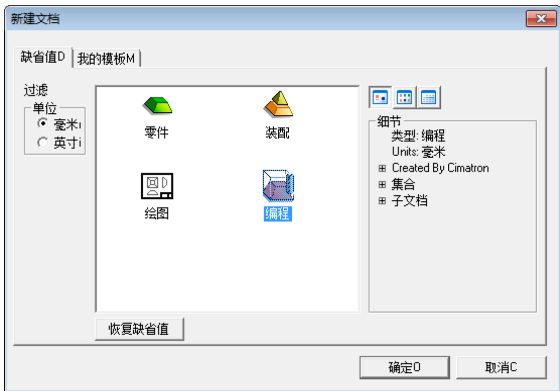


图 3-117 “新建文档”对话框



图 3-118 调入模型

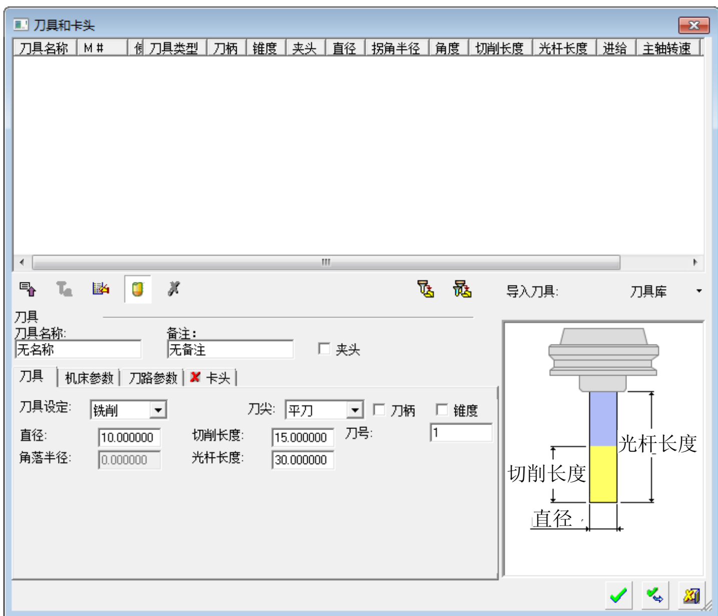


图 3-119 “刀具和卡头”对话框（1）

- 单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-120 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

2）创建 B10 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-121 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

3）创建 B8 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-122 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

4）创建 B6 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-123 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

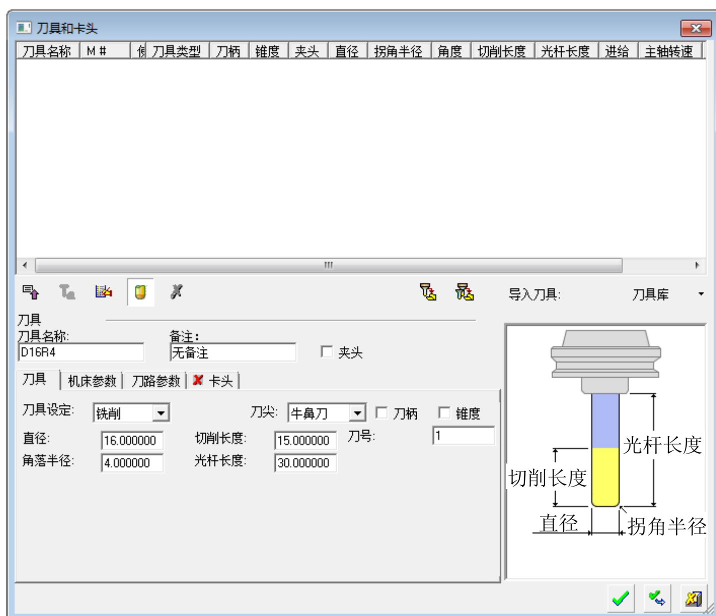


图 3-120　“刀具库”对话框

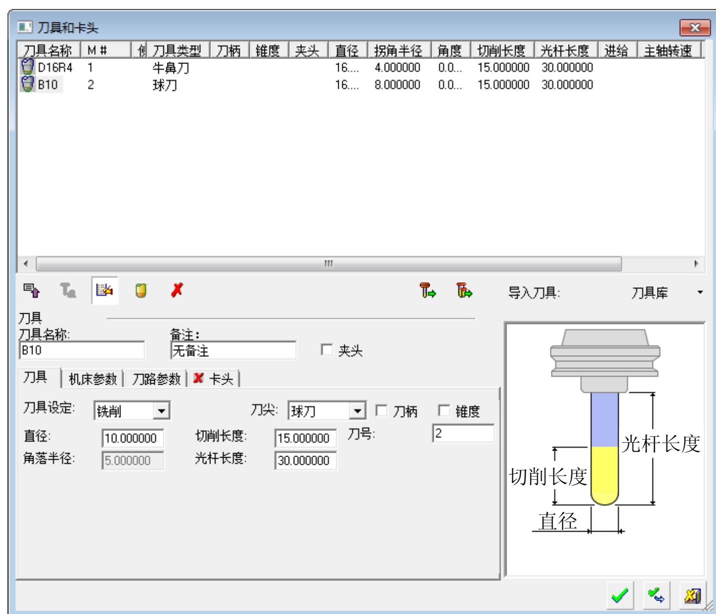


图 3-121　创建 B10 球刀

图 3-122　创建 B8 球刀

图 3-123　创建 B6 球刀

5）创建 B2 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数，如图 3-124 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

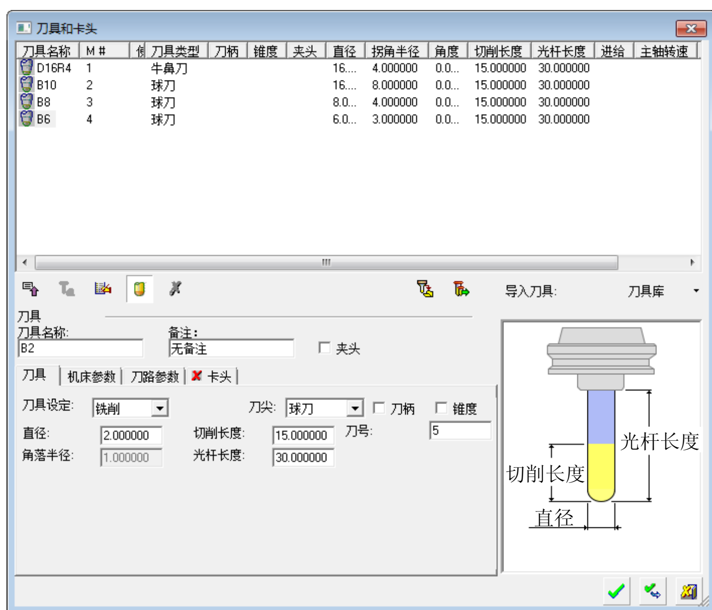


图 3-124　创建 B2 球刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径“类型”为“3 轴”，“UCS”选择“MODEL”，安全平面 Z 为“45”，如图 3-125 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。



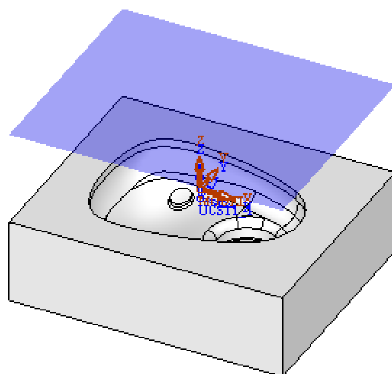


图 3-125　“创建刀路轨迹”对话框

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置

“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮创建零件，如图 3-126 所示。



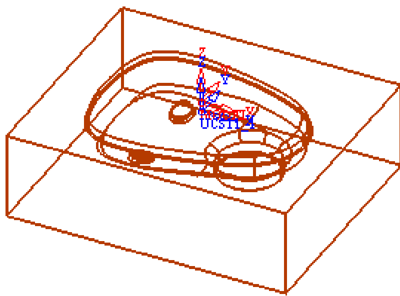
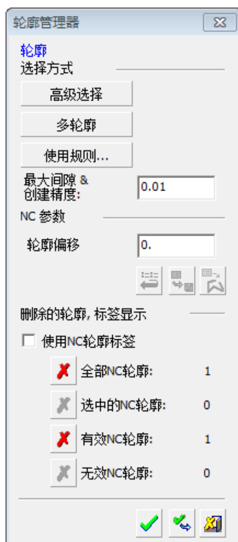


图 3-126　创建零件

5. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择图 3-127 所示的模型边线；单击鼠标中键返回；单击确定按钮返回“初始毛坯”对话框。



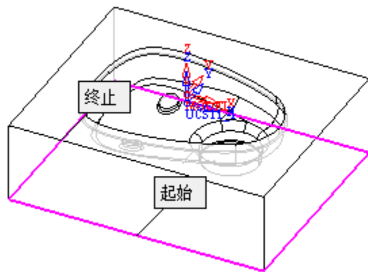


图 3-127　选择轮廓

2）在“Z-顶部”文本框中输入“0.000000”，“Z-底部”为“-50.000000”；单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 3-128 所示。

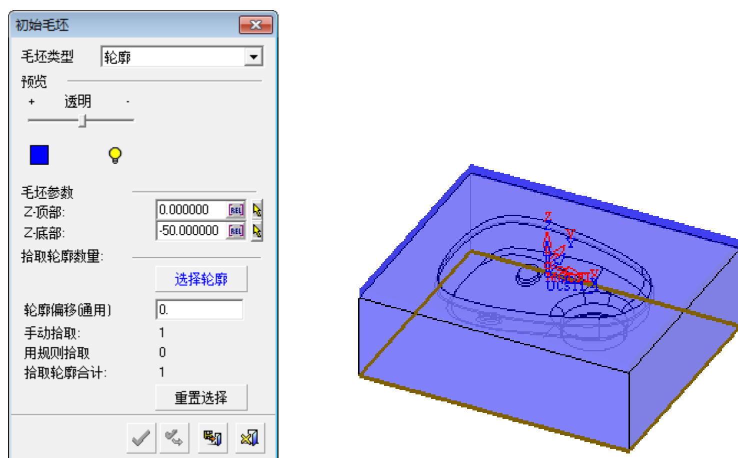


图 3-128　创建的毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 3-129 所示。

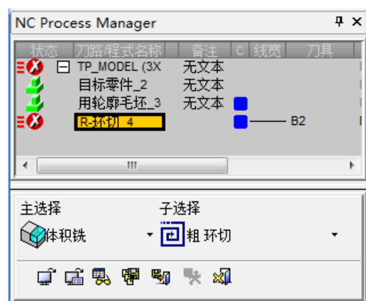


图 3-129　“NC Process Manager”对话框（1）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

● 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-130 所示。

● 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“51”，如图 3-131 所示。

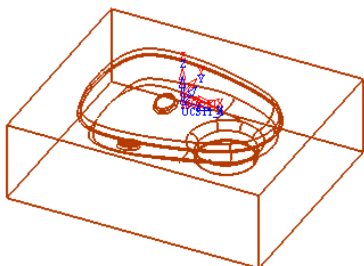


图 3-130　选择所有曲面（1）

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	51

图 3-131　“零件”选项（1）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D16 R4 牛鼻刀，如图 3-132 所示。

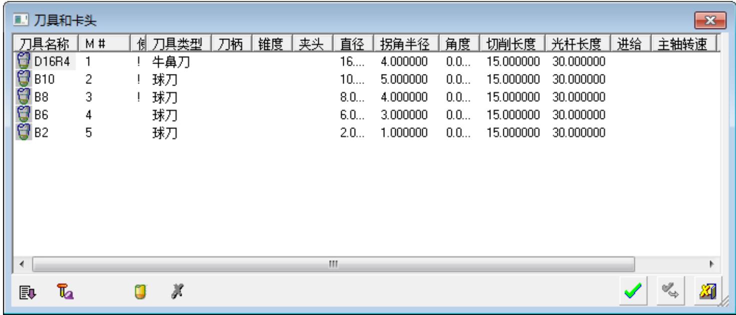


图 3-132　“刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-133 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“15.0000”，如图 3-134 所示。



图 3-133　安全平面（1）

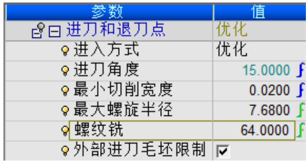


图 3-134　进刀和退刀点（1）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.6”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-135 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”、“策略”为“用户定义”；取消“策略：毛坯环切”复选框，设置“垂直步进类型”为“可变”、“侧向步长”为“1”，选中“真环切”复选框、“加工由”为“区域”；其他参数如图 3-136 所示。

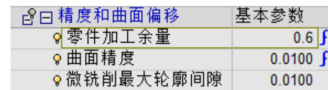


图 3-135　精度和曲面偏移（1）

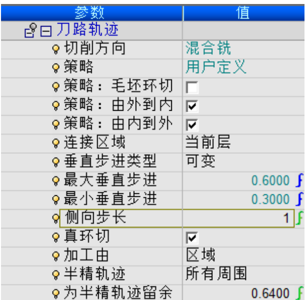


图 3-136　刀路轨迹参数（1）

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 3-137 所示。
- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项；其他参数如图 3-138 所示。

高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	1.0000
预设置的摆线半	4.8000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	1.0000

图 3-137　高速铣（1）

清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000
有效范围半径	0.8400
最狭窄区域宽度	0.2400

图 3-138　清理行间间隙（1）

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 3-139 所示。

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-140 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	603.1858
主轴转速	12000
进给(毫米/分钟)	4000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 3-139　设置机床参数（1）

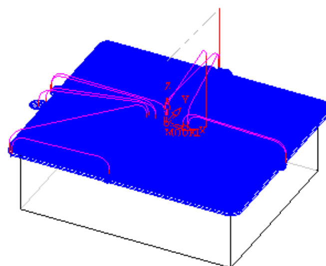


图 3-140　生成的刀具路径（1）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮✓；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-141 所示。

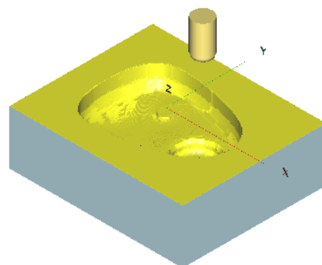


图 3-141　仿真模拟结果（1）

步骤三：体积铣粗环切二次开粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 3-142 所示。

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-143 所示。



图 3-142 “NC Process Manager”对话框（2）

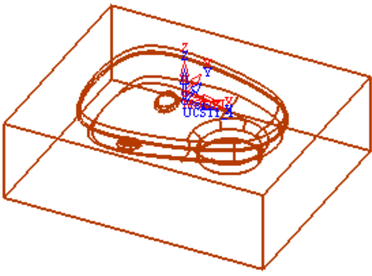


图 3-143 选择所有曲面（2）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“51”，如图 3-144 所示。

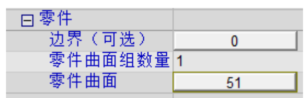


图 3-144 “零件”选项（2）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B10 球刀，如图 3-145 所示。

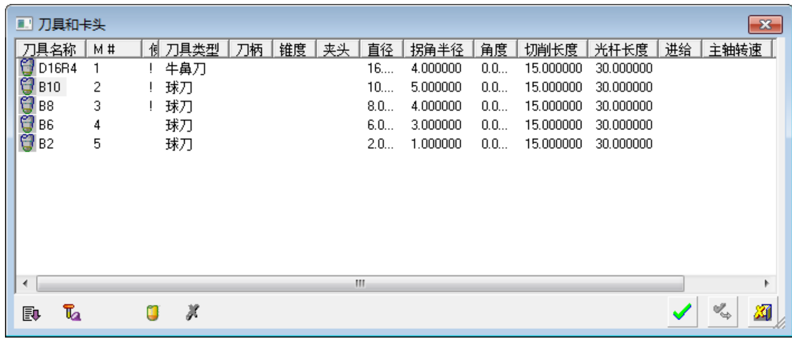


图 3-145 “刀具和卡头”对话框（3）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-146 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“15.0000”，如图 3-147 所示。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	50.0000 ƒ
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5 ƒ
坐标系名称	MODEL

图 3-146　安全平面（2）

参数	值
⊟ 进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	15.0000 ƒ
最小切削宽度	0.0200 ƒ
最大螺旋半径	7.6800 ƒ
螺纹铣	64.0000 ƒ
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-147　进刀和退刀点（2）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.6”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-148 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”、“策略”为“用户定义”，取消“策略：毛坯环切”复选框，设置“垂直步进类型”为“固定+水平面”、“侧向步长”为“0.6000”，选中“真环切”复选框、“加工由”为“区域”；其他参数如图 3-149 所示。

⊟ 精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.6 ƒ
曲面精度	0.0100 ƒ
微铣削最大轮廓间隙	0.0100

图 3-148　精度和曲面偏移（2）

参数	值
⊟ 刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环	☐
策略：由外到	☑
策略：由内到	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	固定 + 水平面
固定垂直步进	0.1500 ƒ
侧向步长	0.6000 ƒ
真环切	☑
从安全平面到	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留	0.0600 ƒ

图 3-149　刀路轨迹参数（2）

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 3-150 所示。
- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项，其他参数如图 3-151 所示。

⊟ 高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	0.6000 ƒ
预设置的摆线	4.8000 ƒ
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	1.0000 ƒ

图 3-150　高速铣（2）

⊟ 清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000 ƒ
有效范围半径	0.8400 ƒ
最狭窄区域宽度	0.2400 ƒ

图 3-151　清理行间间隙（2）

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 3-152 所示。

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框

中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-153 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	1005.3096
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(	30
自适配进给控	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关闭

图 3-152　设置机床参数（2）

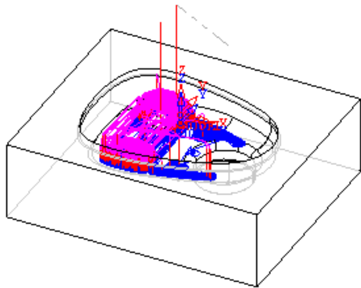


图 3-153　生成的刀具路径（2）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-154 所示。

步骤四：曲面铣精铣全部半精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 3-155 所示。

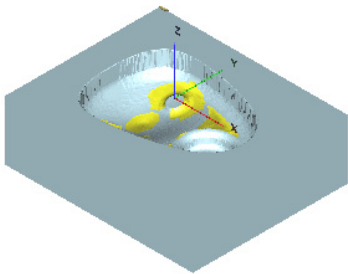


图 3-154　仿真模拟结果（2）

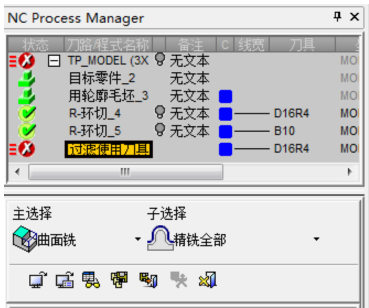


图 3-155　“NC Process Manager”对话框（3）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-156 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“51”，如图 3-157 所示。

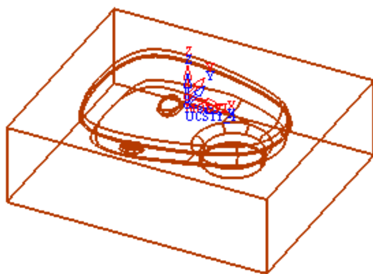
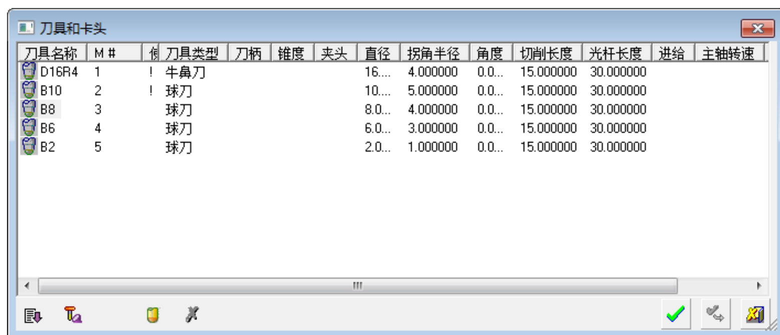


图 3-156　选择所有曲面（3）

参数	值
⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	51
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-157　“零件”选项（3）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B8 球刀，如图 3-158 所示。


刀具和卡头

刀具名称	M #	偵	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D16R4	1	!	牛鼻刀				16....	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B10	2	!	球刀				10....	5.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B8	3		球刀				8.0...	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B6	4		球刀				6.0...	3.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B2	5		球刀				2.0...	1.000000	0.0...	15.000000	30.000000		

图 3-158　“刀具和卡头”对话框（4）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”；设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-159 所示。
- 展开“刀路参数”选项，“进刀和退刀点”中选择“优化”方式，如图 3-160 所示。

参数	值
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	50.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 3-159　安全平面（3）

⊟ 进刀和退刀点	优化
螺纹铣	32.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 3-160　进刀和退刀点（3）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 3-161 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“加工方式”为“3D 步距”，“3D 步距”为“0.3”；其他参数如图 3-162 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-161 精度和曲面偏移（3）

参数	值
刀路轨迹	
加工方式	3D步距
3D 切削方式	顺铣
3D 切削方向	由外向内
3D步距	0.3

图 3-162 刀路轨迹参数（3）

● 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-163 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 3-164 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 3-163 高速铣（3）

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	628.3185
主轴转速	25000
进给(毫米/分钟)	7000.0000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-164 设置机床参数（3）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-165 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-166 所示。

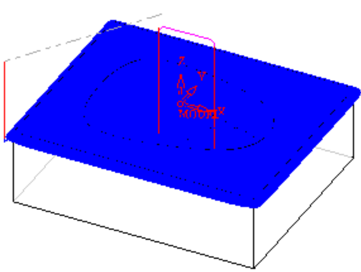


图 3-165 生成的刀具路径（3）

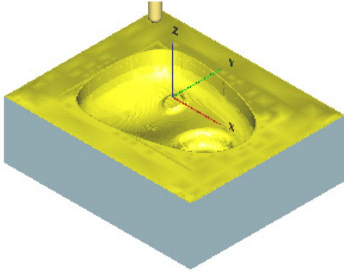


图 3-166 仿真模拟结果（3）

步骤五：曲面铣精铣全部精加工凹腔区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（4），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣全部”，如图 3-167 所示。

2）选择加工曲面和边界，具体操作步骤如下：

● 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显

示，如图 3-168 所示。

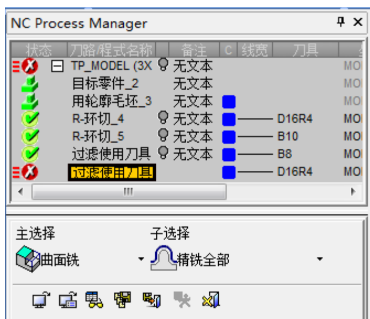


图 3-167 “NC Process Manager”对话框（4）

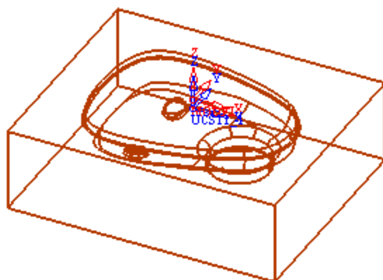
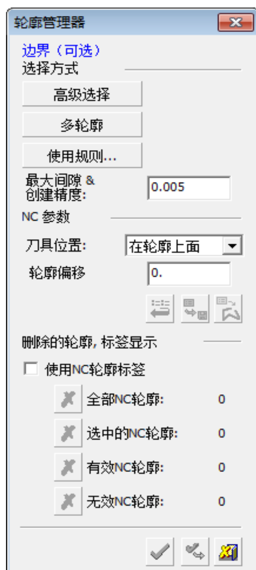


图 3-168 选择所有曲面（4）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“51”，如图 3-169 所示。
- 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置“最大间隙＆创建精度”为“0.005”、“刀具位置”为“在轮廓上面”，选择图 3-170 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。

参数	值
日 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	51
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-169 “零件”选项（4）



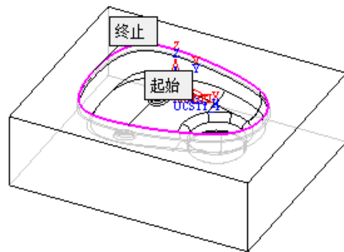


图 3-170 选择边界

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（5），

选择 B6 球刀，如图 3-171 所示。

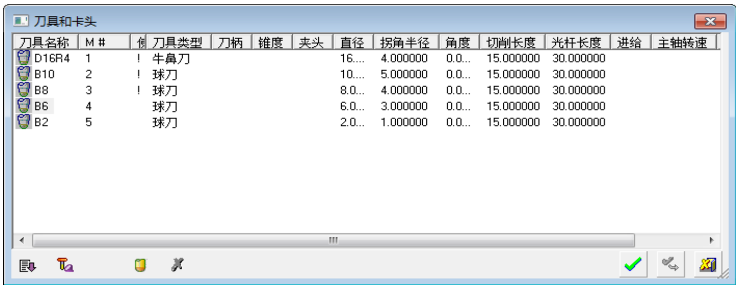


图 3-171 “刀具和卡头”对话框（5）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 3-172 所示。
- 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，选择“优化”方式，如图 3-173 所示。



图 3-172 安全平面（4）

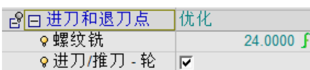


图 3-173 进刀和退刀点（4）

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”，“曲面精度”为“0.005”，其他参数如图 3-174 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，选择“加工方式”为“3D 步距”，设置“3D 切削方式”为“顺铣”、“3D 步距”为“0.1”，其他参数如图 3-175 所示。



图 3-174 精度和曲面偏移（4）

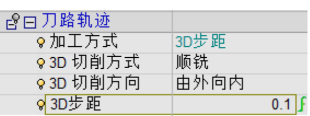


图 3-175 刀路轨迹参数（4）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-176 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 3-177 所示。

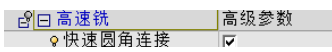


图 3-176 高速铣（4）



图 3-177 设置机床参数（4）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮 ，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-178 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-179 所示。

步骤六：曲面铣精铣水平区域加工分型面

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（5），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣水平区域”，如图 3-180 所示。

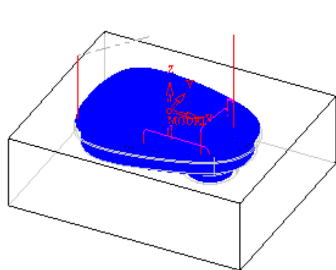


图 3-178　生成的刀具路径（4）

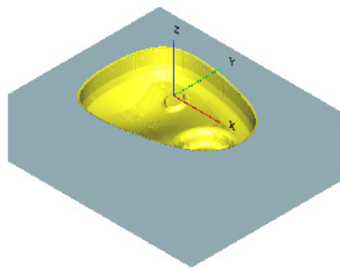


图 3-179　仿真模拟结果（4）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 3-181 所示。

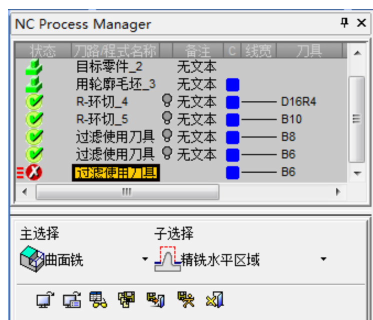


图 3-180　“NC Process Manager”对话框（5）

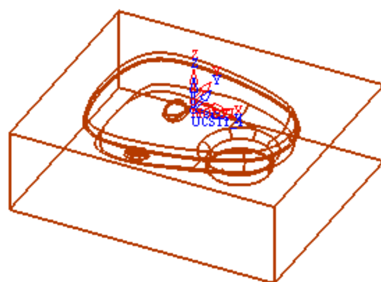


图 3-181　选择所有曲面（5）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“51”，如图 3-182 所示。

3）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.0000”、“曲面精度”为“0.005”，其他参数如图 3-183 所示。

零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	51
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 3-182 “零件”选项（5）

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.0000
曲面精度	0.005
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-183 精度和曲面偏移（5）

- 展开“刀路轨迹”选项，选择“水平加工方法”为“环切”，选择“水平区域切削方向”为“顺铣”，设置“水平步距”为“0.1000”，勾选“真环切”复选框；其他参数如图 3-184 所示。
- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框，其他参数如图 3-185 所示。

刀路轨迹	
水平加工方法	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由外向内
水平步距	0.1000
真环切	☑

图 3-184 刀路轨迹参数（5）

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000

图 3-185 高速铣（5）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 3-186 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 3-187 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	659.7345
主轴转速	35000
进给(毫米/分钟)	8500
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-186 设置机床参数（5）

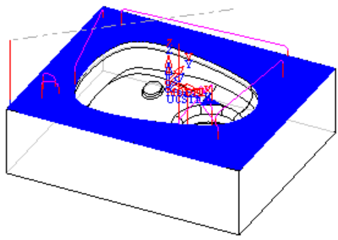


图 3-187 生成的刀具路径（5）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-188 所示。

步骤七：局部精细清根加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC

Process Manager”对话框（6），“主选择”为“局部精细加工”，“子选择”为“清根铣”，如图 3-189 所示。

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（6），选择 B2 球刀，如图 3-190 所示。

3）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.000000”、“曲面精度”为“0.0050”，其他参数如图 3-191 所示。

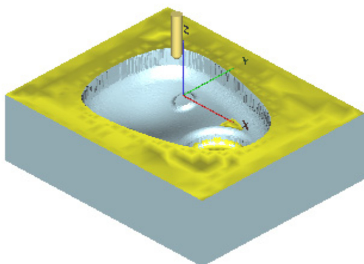


图 3-188　仿真模拟结果（5）

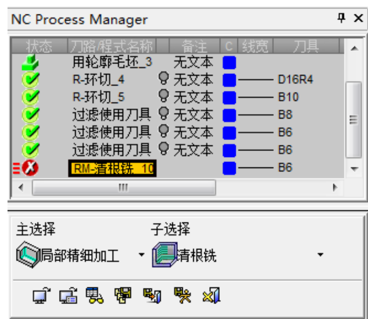
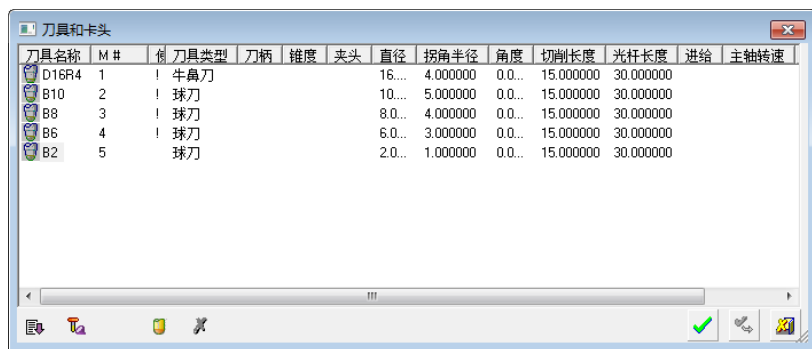


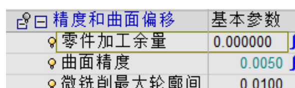
图 3-189　“NC Process Manager”对话框（6）



刀具名称	M #		刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D16R4	1	!	牛鼻刀				16....	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B10	2	!	球刀				10....	5.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B8	3	!	球刀				8.0...	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B6	4	!	球刀				6.0...	3.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B2	5		球刀				2.0...	1.000000	0.0...	15.000000	30.000000		

图 3-190　“刀具和卡头”对话框（6）

● 展开“刀路轨迹”选项，选中“切削方向”为“顺铣”，取消“二次开粗”复选框，设置“水平步距”为“0.0050”、“垂直步进”为“0.0050”、“前一把刀”为“B6”，其他参数如图 3-192 所示。



精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.000000
曲面精度	0.0050
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 3-191　精度和曲面偏移（6）



刀路轨迹	
切削方向	顺铣
二次开粗	☐
加工区域	分割水平/
水平步距	0.0050
减少刀路行数	☑
垂直步进	0.0050
前一把刀偏移	0.0000
前一把刀	B6

图 3-192　刀路轨迹参数（6）

● 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”复选框，如图 3-193 所示。

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 3-194 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑

图 3-193　高速铣（6）

机床参数	
Vc(米/分钟)	376.9911
主轴转速	60000
进给(毫米/分钟)	8400
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 3-194　设置机床参数（6）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 3-195 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 3-196 所示。

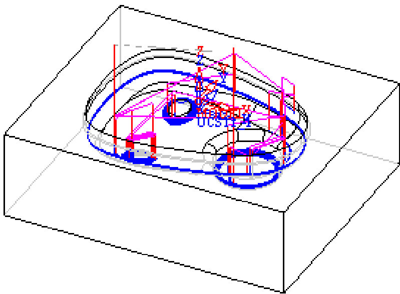


图 3-195　生成的刀具路径（6）

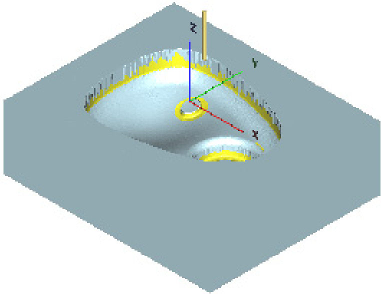


图 3-196　仿真模拟结果（6）

3.3.5　实例总结

本节以按摩器凹模为例，讲解了 Cimatron E9.0 三轴高速铣的加工方法和具体的应用步骤，读者在学习过程中要注意下面两点：

1）在高速加工中往往采用体积铣和曲面铣加工方法，在体积铣加工中对于周边余量不大的零件，如果使用优化策略，将使用毛坯环切方式，可能产生较多的抬刀路径，所以应该使用“用户定义”策略，并取消“毛坯环切”复选框。

2）在高速加工中要设置高速铣选项，包括“摆线”、“快速圆角连接”、“角部圆角连接”等，以保持刀具运动轨迹的光滑与平稳，避免刀具切削方向的突然变化。

第 4 章　Cimatron E9.0 四轴高速加工实例

四轴加工是介于三轴和五轴之间的加工技术。其数控加工原理是通过具有 3 个直线运动轴 X、Y、Z 和一个旋转轴 A（或 B 轴）的数控机床来实现，具有一定的特殊性。本章将按照由浅入深的原则，通过 3 个具体实例来讲解 Cimatron E9.0 四轴高速加工的实际应用。

4.1　入门实例——大导程螺杆四轴高速加工

4.1.1　实例描述

大导程螺杆零件如图 4-1 所示。整个零件由外圆柱面和圆柱面上的方形螺旋槽组成；材料为淬硬工具钢；表面加工粗糙度为 *Ra*0.8 μm；采用四轴加工机床进行加工。

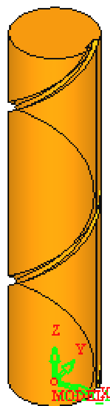


图 4-1　大导程螺杆零件

4.1.2 加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，大导程螺杆零件采用的工艺路线为“外圆粗加工”→“外圆精加工”→“螺旋槽”。大导程螺杆高速数控加工切削参数见表 4-1。

表 4-1 大导程螺杆高速数控加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
8	2	—	—	25000	6000	粗加工
8	2	0.3	0.3	25000	6500	精加工
6	2	0.5	—	35000	6500	精加工

1）外圆柱加工。

外圆柱加工利用零件曲面 4X 进行粗、精加工。设置刀轴方向为 Z 轴；刀具路径方向为圆环绕；刀具采用 B8 球刀。

2）螺旋槽加工。

螺旋槽加工采用轮廓铣 4X 方式，设置“行间模式”为“多个”；“插铣”为“深度”；刀具采用 D6R1 的牛鼻刀。

4.1.3 加工流程与所用知识点

大导程螺杆数控加工具体的设计流程和知识点，如表 4-2 所示。

表 4-2 大导程螺杆数控加工具体的设计流程和知识点

步 骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 2： 创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择适用的刀具	
Step 3： 创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	
Step 4： 创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step5： 零件曲面四轴粗加工	零件曲面 4X 是在零件曲面上生成按曲面流线方向的刀具路径，其特点是按曲面的流线方向切削一个或者一组连续曲面	
Step6： 零件曲面四轴精加工	零件曲面 4X 是在零件曲面上生成按曲面流线方向的刀具路径，其特点是按曲面的流线方向切削一个或者一组连续曲面	
Step7： 轮廓铣四轴螺旋槽加工	轮廓铣是一种沿着轮廓进行多轴加工的铣削方式，它沿着空间轮廓进行加工，生成的路径与轮廓完全重合	

4.1.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E。启动 Cimatron E，选择下拉菜单“文件”→“新建文档”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 4-2 所示。单击“确定”按钮，进入编程界面。



图 4-2　“新建文档”对话框

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“luozhu.elt”（“随书光盘：\Chapter04\4.1\uncompleted\luozhu.elt”）文件；单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 4-3 所示。

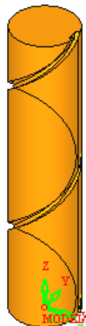


图 4-3　调入模型

2．创建刀具

1）创建 B8 的球刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 4-4 所示。
- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-5 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

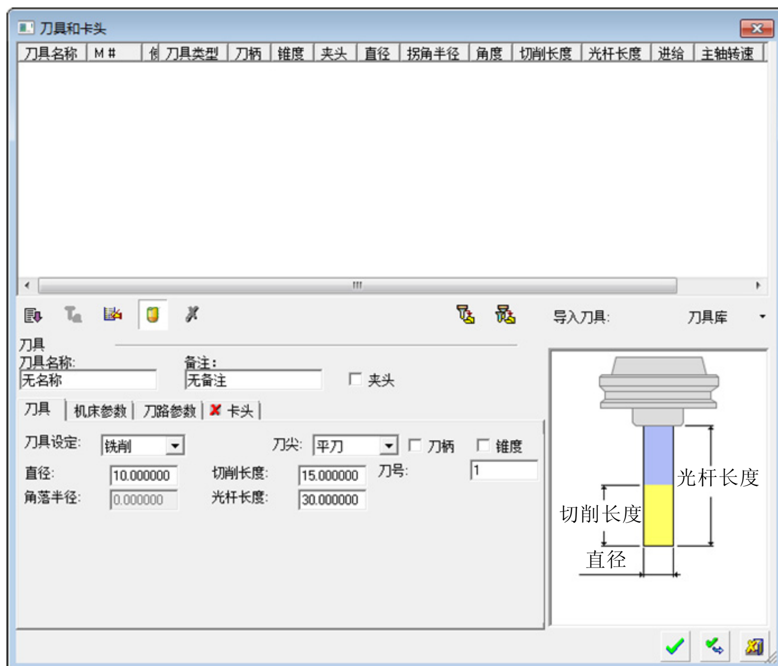


图 4-4 “刀具和卡头”对话框（1）

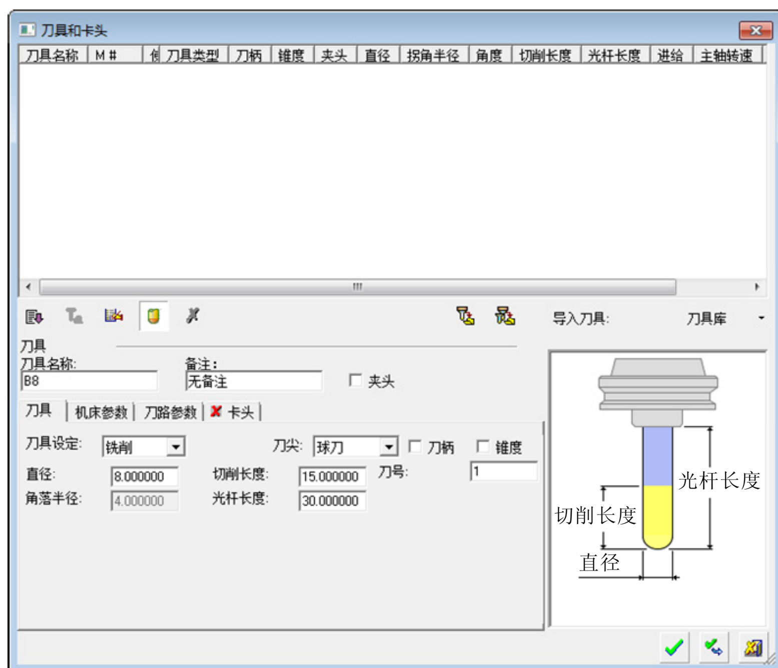


图 4-5 “刀具库”对话框

2）创建 D6R1 牛鼻刀。单击加工向导工具栏上的刀具按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-6 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

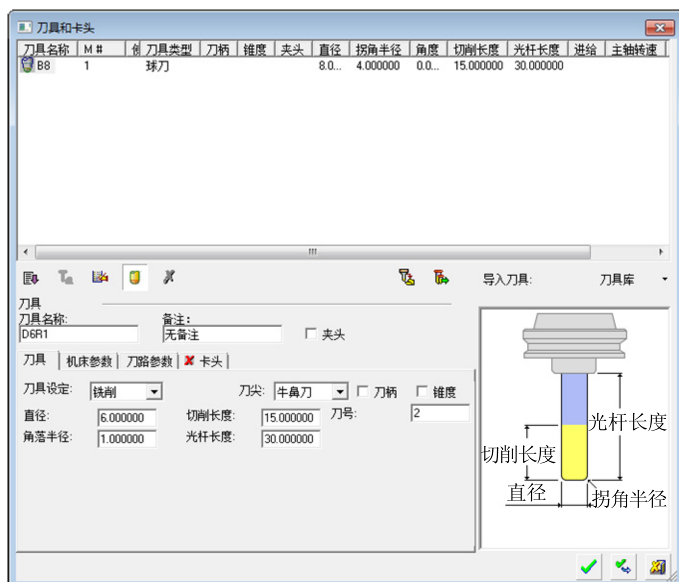


图 4-6　创建 D6R1 牛鼻刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“4 轴”，“旋转轴”为“Z 轴”，UCS 选择“MODEL”，安全平面 Z 为“210”，如图 4-7 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

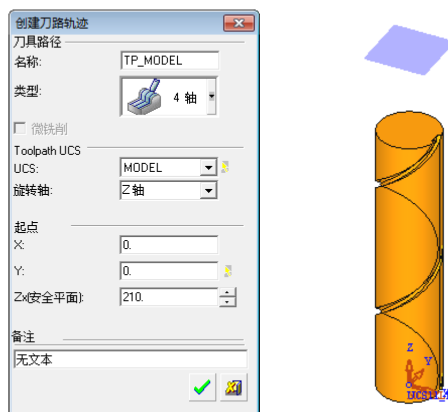


图 4-7　“创建刀路轨迹”对话框

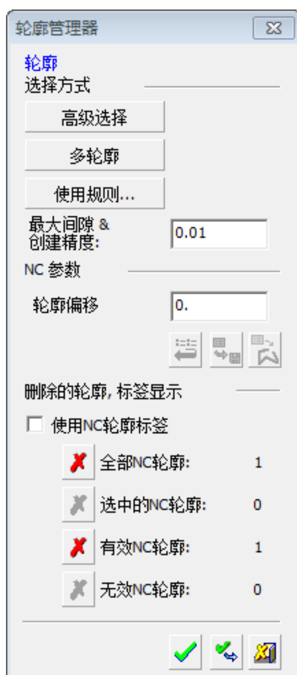


注意

旋转轴为刀具要进行旋转的轴，要根据加工要求选择 X、Y 或者 Z 轴。

4. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 4-8 所示的模型边线，单击鼠标中键返回；单击确定按钮返回“初始毛坯”对话框。



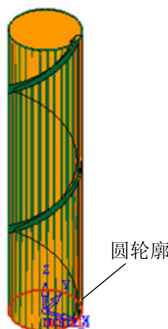


图 4-8 选择轮廓



注意

选择轮廓时，要单击工具栏上的按钮，将隐藏的圆柱曲面显示出来，然后再选择圆柱曲面的边线。

2）在“Z-顶部”文本框中输入 160.000000，“轮廓偏移”为“2”；单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 4-9 所示。

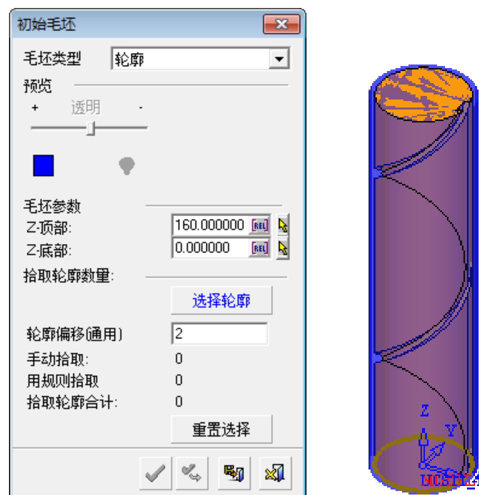


图 4-9　创建的毛坯

步骤二：零件曲面 4X 外圆柱曲面粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“局部操作”，“子选择”为“零件曲面 4X”，如图 4-10 所示。

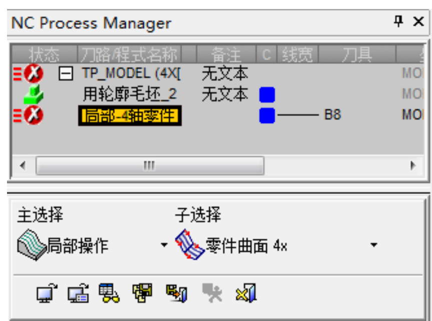


图 4-10　“NC Process Manager”对话框（1）

2）选择零件曲面和检查曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后选择如图 4-11 所示的曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框。



注意

选择轮廓时，要单击工具栏上的按钮，将隐藏的圆柱曲面显示出来，然后再选择圆柱曲面。

- 展开“零件”选项，单击“检查曲面”按钮，然后选择如图 4-12 所示的曲面；单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框。

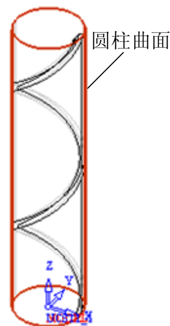


图 4-11　选择加工曲面（1）

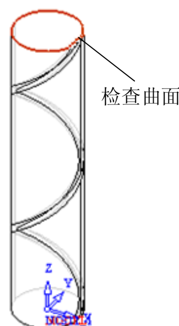


图 4-12　选择检查曲面

3）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“进刀/退刀”中设置“曲面进刀”为“标准”；其他参数如图 4-13 所示。
- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为 0.3；其他参数如图 4-14 所示。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊟ 进刀/退刀	
曲面进刀	标准
长度	2.0000

图 4-13　进刀/退刀（1）

参数	值
⊟ 精度和曲面偏移	高级参数
零件加工余量	0.3
检查曲面偏移	-0.0200
逼近方式	根据精度
零件曲面精度	0.0100
检查曲面精度	0.0100

图 4-14　精度和曲面偏移（1）

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“步进方式”为“根据残留”，并调整“铣削位置”、“加工方向”和“重新定义起始角”，如图 4-15 所示。

参数	值
残留高度	0.0200
最小 3D 侧向步长	0.0000
切削方向	双向
步进方式	根据残留
前倾角	0.0000
干涉检查	☑
最大步长角度	2.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
临界铣削长度	选择
重置铣削宽度	重置
重置铣削长度	重置
4 轴联动铣	☑

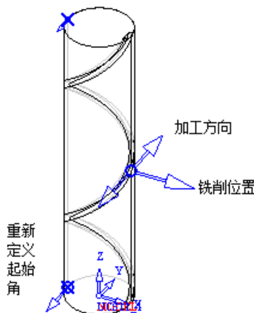


图 4-15　刀路轨迹参数（1）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 4-16 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	628.3185
主轴转速	25000
进给(毫米/分钟)	6500.0000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 4-16　设置机床参数（1）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-17 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的粗加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 4-18 所示。

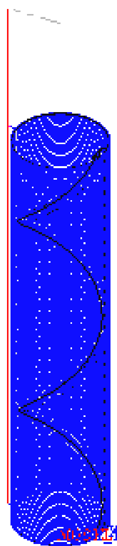


图 4-17　生成的刀具路径（1）

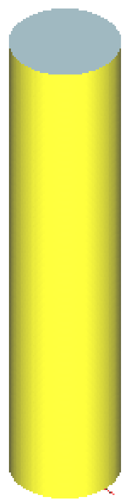


图 4-18　仿真模拟结果（1）

步骤三：零件曲面 4X 外圆柱曲面精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“局部操作”，“子选择”为“零件曲

面 4X”，如图 4-19 所示。

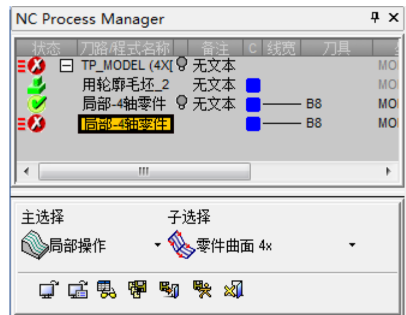


图 4-19 “NC Process Manager”对话框（2）

2）设置加工参数；具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“进刀/退刀”中设置“曲面进刀”为“标准”，其他参数如图 4-20 所示。
- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“零件加工余量”为 0.000000；其他参数如图 4-21 所示。

参数	值
刀路参数	
进刀/退刀	
曲面进刀	标准
长度	2.0000

图 4-20 进刀/退刀（2）

精度和曲面偏移	高级参数
零件加工余量	0.000000
检查曲面偏移	-0.0200
逼近方式	根据精度
零件曲面精度	0.0100
检查曲面精度	0.0100

图 4-21 精度和曲面偏移（2）

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“步进方式”为“根据残留”，并调整铣削位置、加工方向和重新定义起始角，如图 4-22 所示。

参数	值
残留高度	0.0050
最小 3D 侧向步长	0.0000
切削方向	双向
步进方式	根据残留
前倾角	0.0000
干涉检查	☑
最大步长角度	2.0000
铣削位置	反向
加工方向	反向
重新定义起始角	选择
临界铣削宽度	选择
临界铣削长度	选择
重置铣削宽度	重置
重置铣削长度	重置
4 轴联动铣	☑

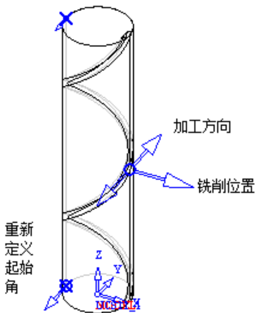


图 4-22 刀路轨迹参数（2）

3）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-23 所示。

4）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 4-24 所示。

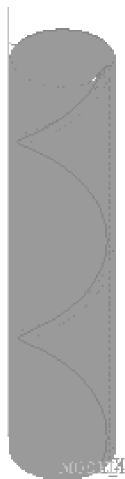


图 4-23　生成的刀具路径（2）



图 4-24　仿真模拟结果（2）

步骤四：轮廓铣四轴加工螺杆槽

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“轮廓铣”，“子选择”为“4 轴铣曲线”，如图 4-25 所示。

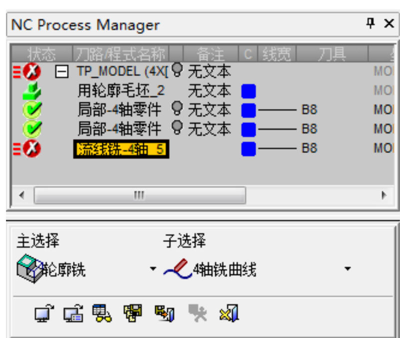


图 4-25　“NC Process Manager”对话框（3）

2）选择零件曲面和轮廓，具体操作步骤如下：

● 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面，如图 4-26 所示。单击鼠标中

键，完成曲面选择，返回程序对话框。



图 4-26 选择加工曲面（2）

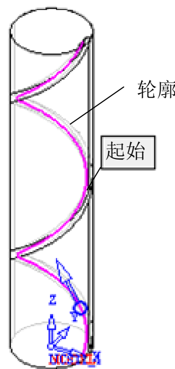


图 4-27 选择加工轮廓

- 单击“轮廓”按钮，选择如图 4-27 所示的加工轮廓，单击鼠标中键完成选择，返回程序对话框。

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 B8 球刀，如图 4-28 所示。

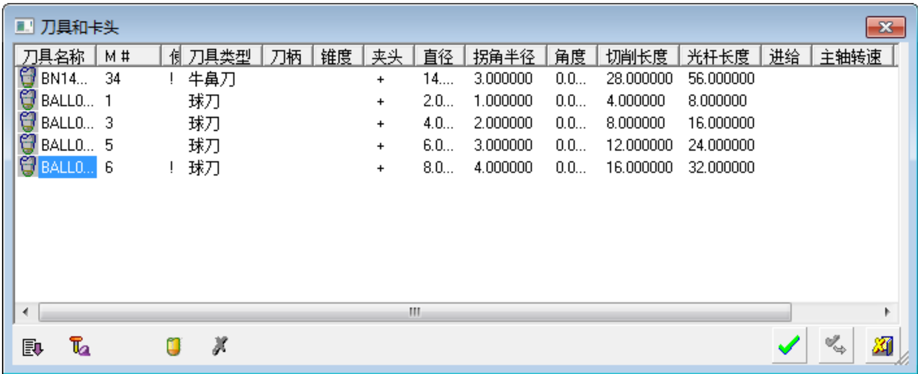


图 4-28 “刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项，在“进刀/退刀”中设置“曲面进刀”为“标准”；其他参数如图 4-29 所示。

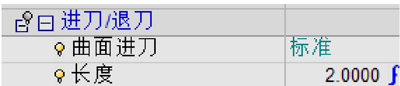


图 4-29 进刀/退刀（3）

- 展开“刀路参数”选项中的“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“连接通过”为“增量”，设置“增量”为“20.0000”，如图 4-30 所示。
- 展开“刀路参数”选项，在“精度和曲面偏移”中设置“曲面等距”为“0.0000”；其他参数如图 4-31 所示。

参数	值
安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	210.0000
连接通过	增量
增量	20.0000
坐标系名称	MODEL

图 4-30　安全平面

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
曲面等距	0.0000
精度	0.0100
微铣削最大轮廓间隙	0.0100

图 4-31　精度和曲面偏移（3）

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“行间模式”为“单个”，“插铣”为“深度”，并调整铣削位置和设置其他参数，如图 4-32 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	单向
行间模式	单个
插铣	深度
深度	2.0000
切削深度	0.5000
最大步长角度	8.0000
前倾角	0.0000
侧倾角	0.0000
铣削位置	反向

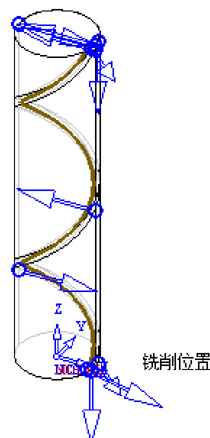


图 4-32　刀路轨迹参数（3）

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 4-33 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	659.7345
主轴转速	35000
进给(毫米/分钟)	8000
空走刀连接	快速移动
切入进给速率(%)	30
侧向进给速率(%)	30
向下进给速率(%)	50
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 4-33　设置机床参数（2）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-34 所示。

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 4-35 所示。

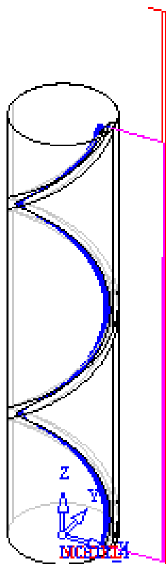


图 4-34 生成的刀具路径（3）

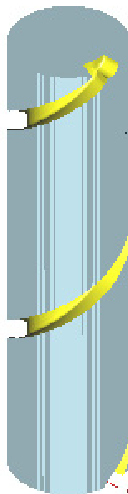


图 4-35 仿真模拟结果（3）

4.1.5 实例总结

本节以大导程螺杆为例讲解了 Cimatron E9.0 四轴高速加工的方法和具体应用步骤，读者在学习过程重要注意下面两点：

1）在四轴加工中，曲面加工主要采用局部操作：瞄准曲面 4X 和零件曲面 4X。瞄准曲面 4X 是在零件曲面上生成由瞄准曲面投影下来的刀具路径，瞄准曲面 4X 在实际应用中常用于曲面环状区域的加工。零件曲面 4X 是在零件曲面上生成曲面流线方向的刀具路径，其特点是按曲面的流线方向切削一个或者一组连续曲面，主要用于单个面或相毗邻的几个曲面的加工。

2）在四轴加工中，轮廓加工方法主要采用轮廓铣四轴。轮廓铣是一种沿着轮廓进行多轴加工的铣削方式。它沿着空间轮廓进行加工，生成的路径与轮廓完全重合。

4.2　提高实例——衣模四轴高速加工

4.2.1　实例描述

衣模零件如图 4-36 所示；材料为淬硬工具钢，表面加工粗糙度为 *Ra*0.8μm；采用 4 轴加工机床加工。

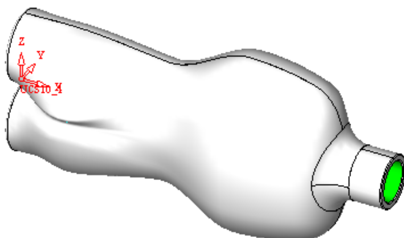


图 4-36　衣模零件

4.2.2　加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，衣模零件采用的工艺路线为粗加工→精加工。衣模高速数控加工中所用到的切削参数见表 4-3。

表 4-3　衣模零件加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
8	2	0.2	0.45	20000	6000	粗加工
3	2	-	-	60000	9600	精加工

1）粗加工

利用辅助平面作为分割面，首先采用较大直径的刀具进行粗加工，以便于去除大量多余留量。粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具为 *Φ*8mm、*R*1mm 的牛鼻刀；然后采用刀具路径转换——镜像复制的方法生成另外一侧的刀轨。

2）精加工

精加工采用航空铣方式，控制刀轴为 4 轴，采用平行方式走刀，刀具为直径 *Φ*3mm 的球刀。

4.2.3　加工流程与所用知识点

衣模零件数控加工具体的设计流程和知识点，如表 4-4 所示。

表 4-4 衣模零件数控加工具体的设计流程和知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1： 导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2： 创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择适用的刀具	
Step 3： 创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	
Step 4： 创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step5： 体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	
Step6： 镜像刀轨	通过刀轨镜像操作简化刀轨的创建	
Step7： 航空铣精加工	航空铣是 Cimatron E9.0 多轴加工的主要加工方式之一，通过选择刀轨输出为“4 轴”来实现四轴加工	

4.2.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单文件→新建文件命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 4-37 所示。单击“确定”按钮进入编程界面。



图 4-37 “新建文档”对话框

2）调入模型，具体操作步骤如下：

- 单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“yimo.elt”（“随书光盘：\Chapter04\4.2\uncompleted\yimo.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。
- 单击“Feature Guide”对话框的确定按钮，完成模型调入，如图 4-38 所示。

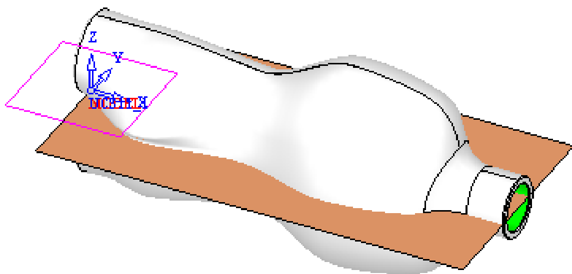


图 4-38 调入模型

2. 创建刀具

1）创建 D8R1 的圆角刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 4-39 所示。
- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-40 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

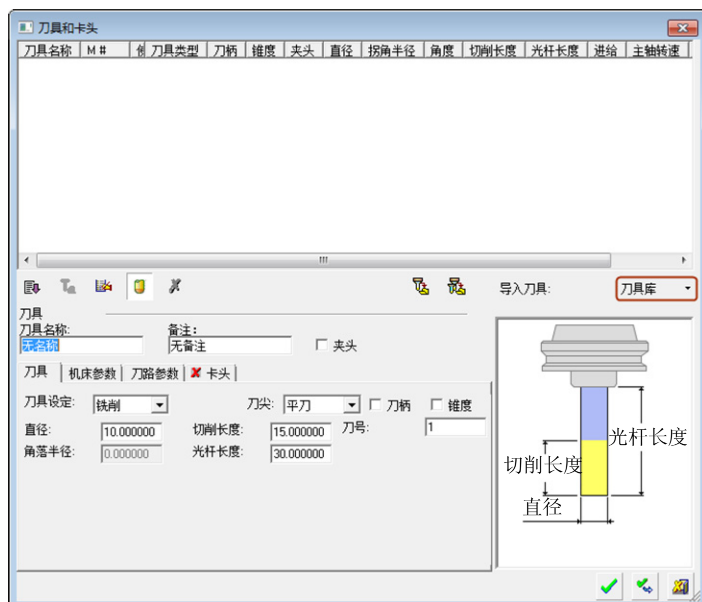


图 4-39 “刀具和卡头”对话框（1）

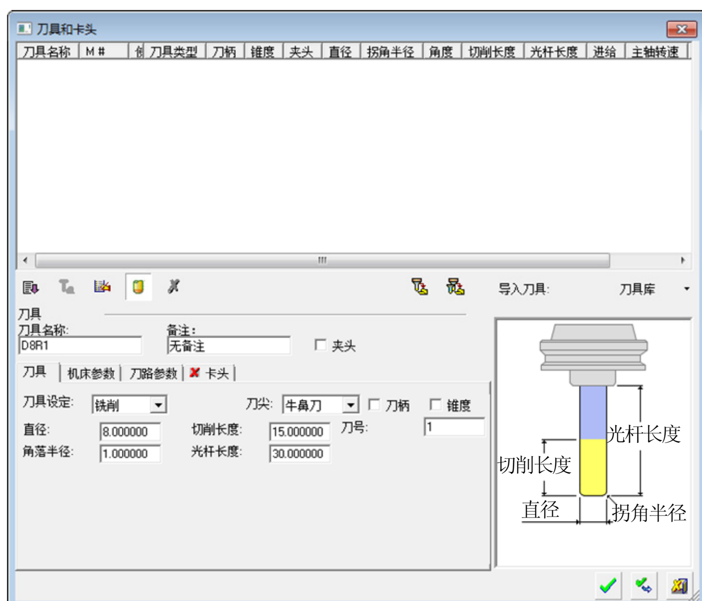


图 4-40 “刀具库”对话框

2）创建 B3 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-41 所示。依次单击

确定按钮✓，完成刀具创建。

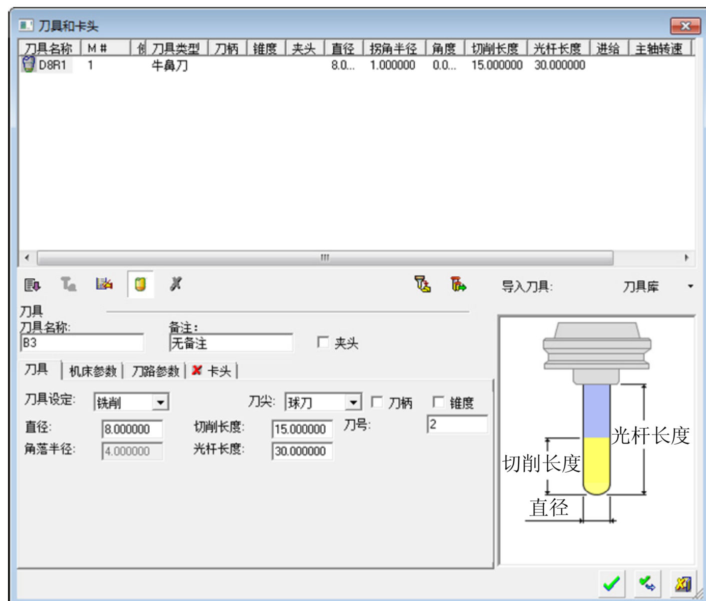


图 4-41 创建 B3 球刀

3．创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“4 轴”，UCS 选择“MODEL”，“旋转轴”为“X 轴”，安全平面 Z 为“78”，如图 4-42 所示。单击确定按钮✓，完成刀路轨迹的创建。



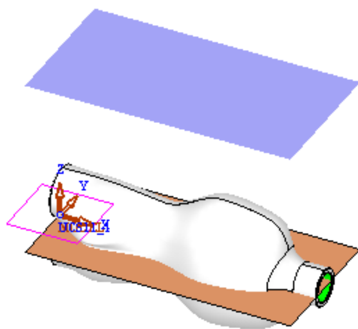


图 4-42 “创建刀路轨迹”对话框

4．创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 4-43 所示的模型边线，单击鼠标中键返回；单击确定按钮✓返回“初始毛坯”对话框。

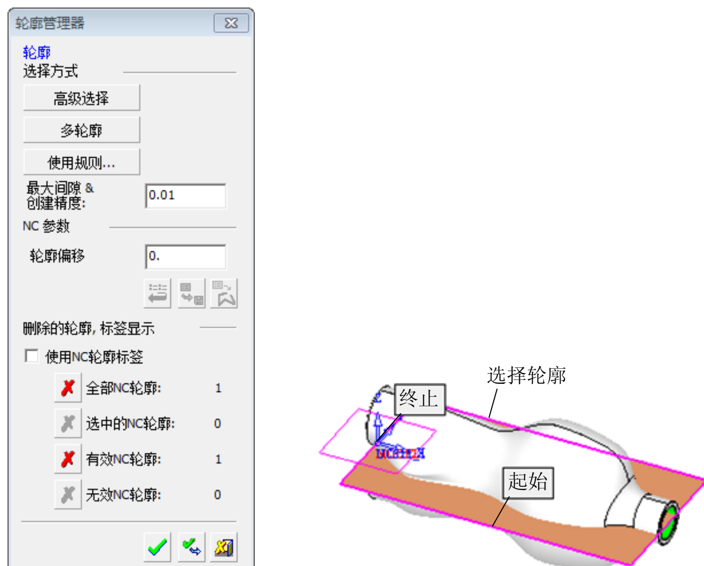


图 4-43　选择轮廓

2）在“Z-顶部”和“Z-底部”文本框中输入“32.000000”和“–32.000000”，单击确定按钮✓，完成毛坯的创建，如图 4-44 所示。

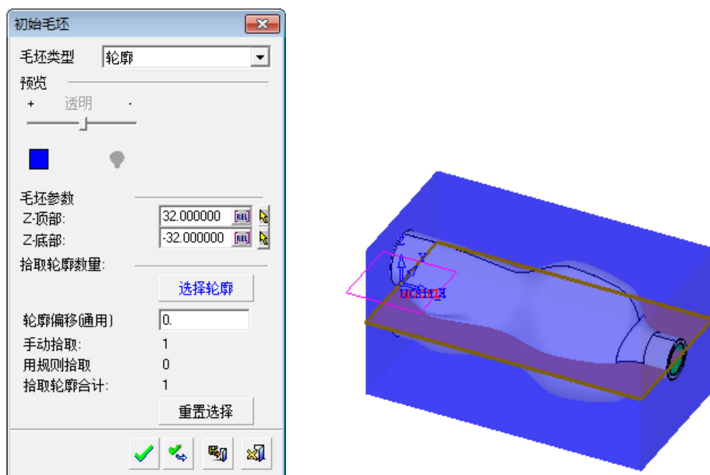


图 4-44　创建的毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 4-45 所示。

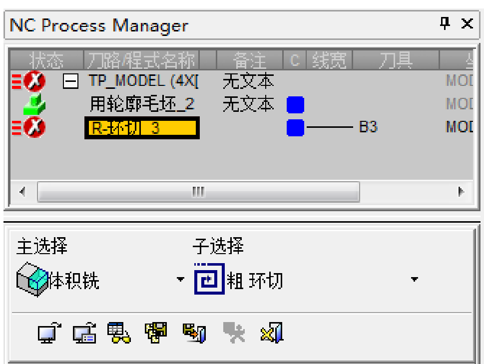


图 4-45 “NC Process Manager”对话框（1）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 4-46 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“19”，如图 4-47 所示。

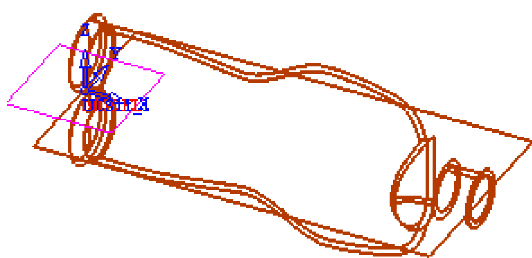


图 4-46 选择所有曲面

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	19

图 4-47 “零件”选项

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D8R1 牛鼻刀，如图 4-48 所示。

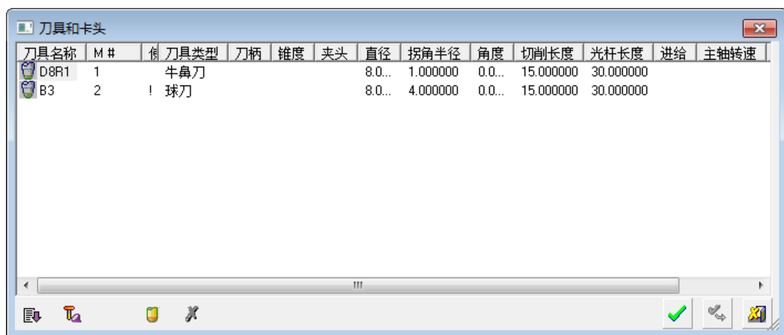


图 4-48 “刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中的“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5”，如图 4-49 所示。
- 展开“刀路参数”选项中的“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“12.000000”，如图 4-50 所示。

参数	值
安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	78.0000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5
坐标系名称	MODEL

图 4-49　安全平面

参数	值
进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	12.000000
最小切削宽度	0.0200
最大螺旋半径	3.8400
螺纹铣	32.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 4-50　进刀和退刀点

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 4-51 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”，“策略”为“用户定义”，取消“策略：毛坯环切”复选框，“固定垂直步进”为“0.2000”、“侧向步长”为“0.4500”；选中“真环切”复选框，“加工由”为“区域”；其他参数如图 4-52 所示。

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间隙	0.0100

图 4-51　精度和曲面偏移

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	固定 + 水平面
固定垂直步进	0.2000
侧向步长	0.4500
真环切	☑
从安全平面到固定层	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留余量	0.0450

图 4-52　刀路轨迹参数

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 4-53 所示。
- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项；其他参数如图 4-54 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	0.4500
预设置的摆线半径	2.4000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.6000

图 4-53　高速铣

清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000
有效范围半径	0.8400
最狭窄区域宽度	0.2400

图 4-54　清理行间间隙

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 4-55 所示。

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-56 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	502.6548
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 4-55　设置机床参数（1）

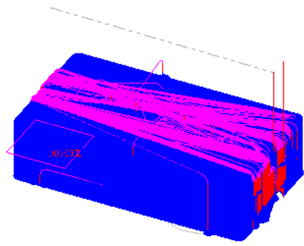


图 4-56　生成的刀具路径（1）

步骤三：刀轨的镜像复制

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“转换”，“子选择”为“镜像复制”，如图 4-57 所示。

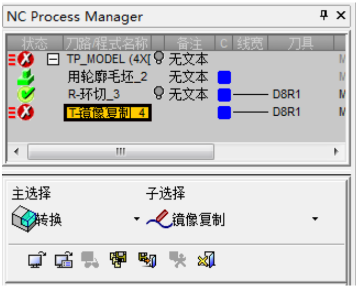


图 4-57　“NC Process Manager”对话框（2）

2）选择零件，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，然后单击“程序”按钮，弹出“程序选择”对话框，选择“体积铣-粗环切_3”加工程序，选中的加工程序将被勾选，如图 4-58 所示。最后单击确定按钮。

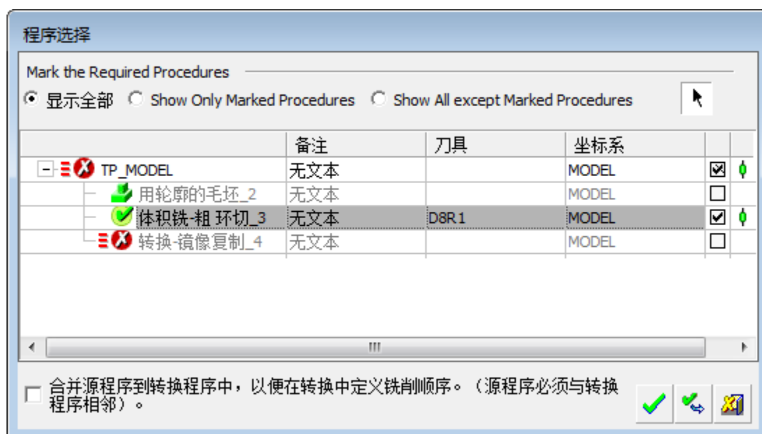
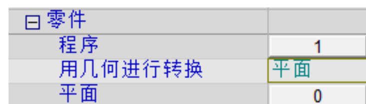


图 4-58　选择加工程序

- 选择“用几何进行转换”为“平面”，单击“平面”按钮，然后选择如图 4-59 所示的平面；单击确定按钮完成选择，返回程序对话框。



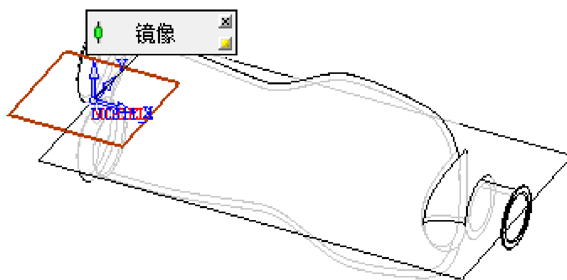


图 4-59　选择镜像平面

3）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-60 所示。

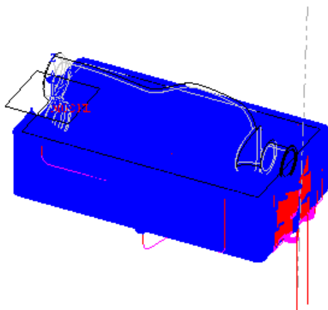


图 4-60 生成的刀具路径（2）

步骤四：航空铣四轴精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 4-61 所示。

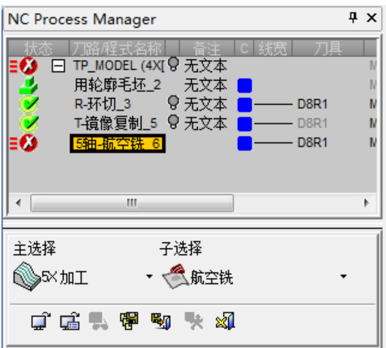


图 4-61 “NC Process Manager”对话框（3）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择“B3”球刀，如图 4-62 所示。

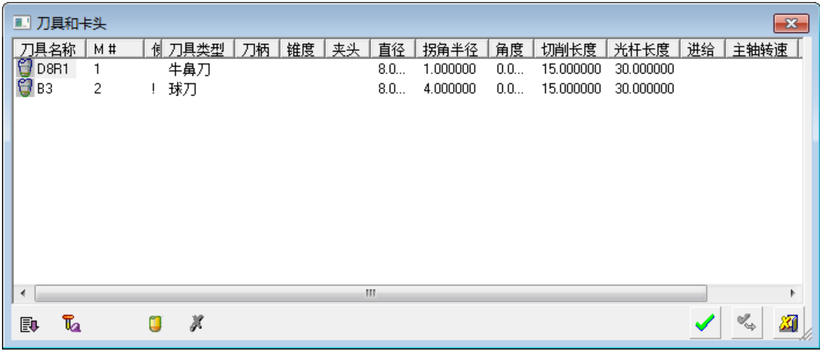


图 4-62 “刀具和卡头”对话框（3）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框，选择“工艺类型”为“平行铣”；设置其他参数如图 4-63 所示。

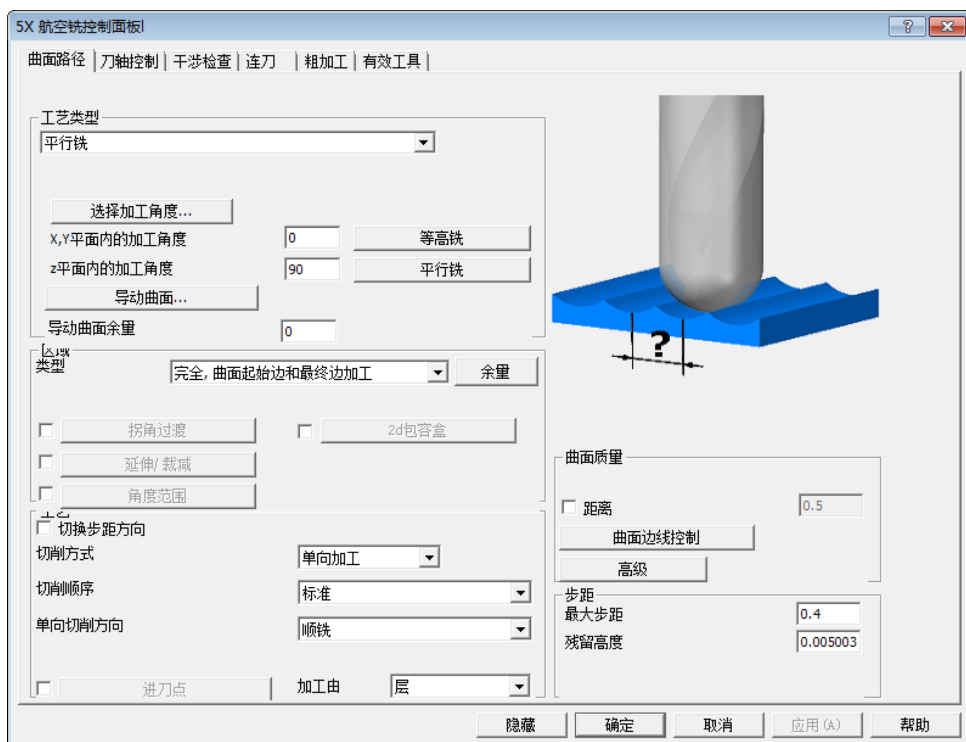


图 4-63　“5X 航空铣控制面板”对话框

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 4-64 所示的衣模曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

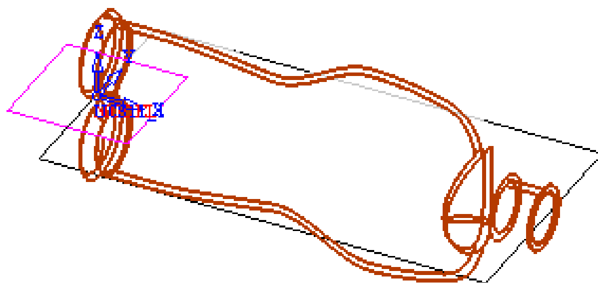


图 4-64　选择导动曲面

4）设置刀轴，具体操作步骤如下：

- 选择“刀轴控制”选项卡，选择“输出格式”为“4 轴”，设置“最大角度步距”为“3”，如图 4-65 所示。

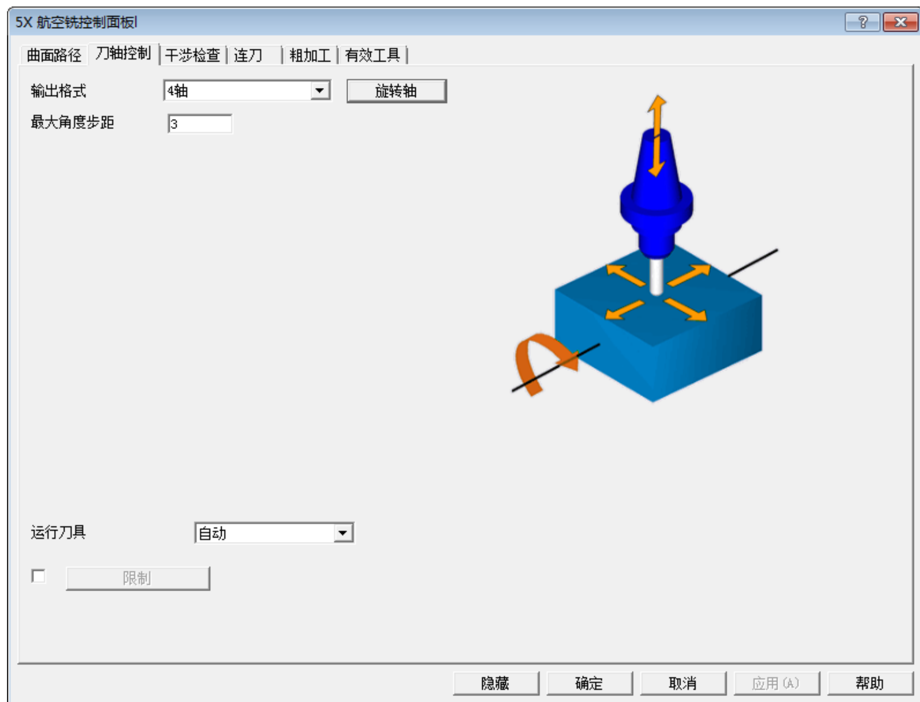


图 4-65 “刀轴控制”选项卡

- 单击“旋转轴”按钮，选择“X 轴”为“第 4 轴”，勾选“指定刀具旋转轴”复选框，如图 4-66 所示。单击“确定”按钮返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

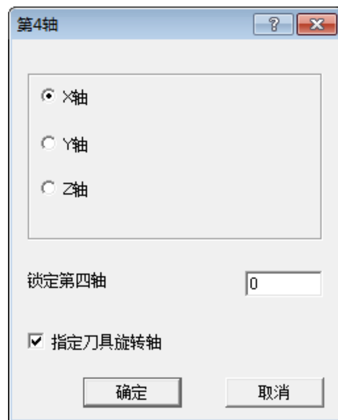


图 4-66 “指定刀具旋转轴”

5）选择“连刀”选项卡，选择“小间隙”为“直接”，“大间隙”为“沿曲面”；设置其他参数如图 4-67 所示。

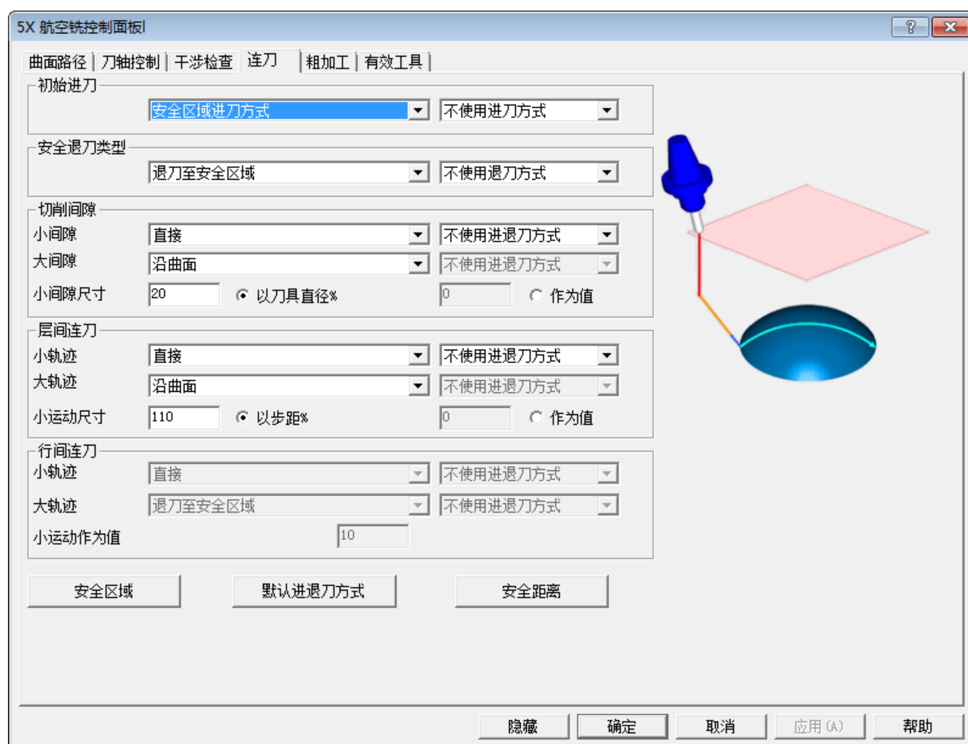


图 4-67　“连刀”选项卡

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 4-68 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-69 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	1507.9645
主轴转速	60000
进给(毫米/分钟)	9600.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 4-68　设置机床参数（2）

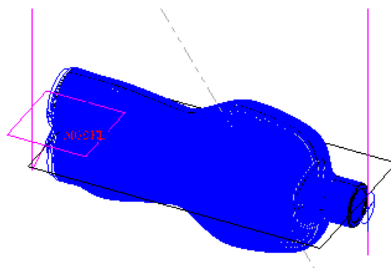


图 4-69　生成的刀具路径（2）

4.2.5 实例总结

本节以衣模零件为例讲解了 Cimatron E9.0 四轴高速加工方法和具体过程，读者在学习过程中要注意的是：航空铣也是四轴高速加工的方法之一，此时要在“刀轴控制”选项的输出格式中选择为“4 轴”，即设置刀轴的控制方式为“4 轴”。

4.3 经典实例——叶片四轴高速加工

4.3.1 实例描述

叶片零件如图 4-70 所示，材料为淬硬工具钢，表面加工粗糙度为 *Ra*0.8μm，两侧固定在旋转工作台上。

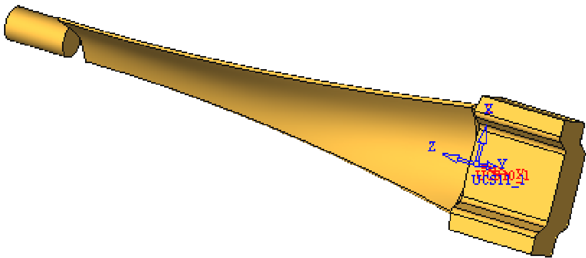


图 4-70 叶片零件

4.3.2 加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，叶片零件采用工艺路线为“粗加工”→“精加工”。叶片高速数控加工中所用到的切削参数，见表 4-5。

表 4-5 叶片加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
16	2	—	—	15000	5000	粗加工
10	2	—	—	20000	8000	精加工

1）粗加工。首先采用较大直径的刀具 D16R4 进行粗加工，利用航空铣四轴加工方式，通过两曲线之间仿形铣方式进行，保留余量为 0.3mm。

2）精加工。精加工采用航空铣四轴方式，通过两曲线之间仿形铣方式进行，刀具为直径 Φ3mm 的球刀。

4.3.3　加工流程与所用知识点

叶片零件数控加工具体的设计流程和知识点，如表 4-6 所示。

表 4-6　叶片零件数控加工具体的设计流程和知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择适用的刀具	光杆长度 切削长度 直径
Step 3：创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	创建刀路轨迹 刀具路径 名称: TP_MODEL 类型: 4 轴 微铣削 Toolpath UCS UCS: MODEL 旋转轴: X轴 起点 X: 0. Y: 0. Z(安全平面): 150. 备注 无文本

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 4：创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	
Step 5：创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6：航空铣粗加工	航空铣是 Cimatron E 多轴加工的主要加工方式之一，通过选择刀轨输出为“4 轴”来实现四轴加工	
Step7：航空铣精加工	航空铣是 Cimatron E 多轴加工的主要加工方式之一，通过选择刀轨输出为“4 轴”来实现四轴加工	

4.3.4　具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 4-71 所示。单击“确定”按钮进入编程界面。

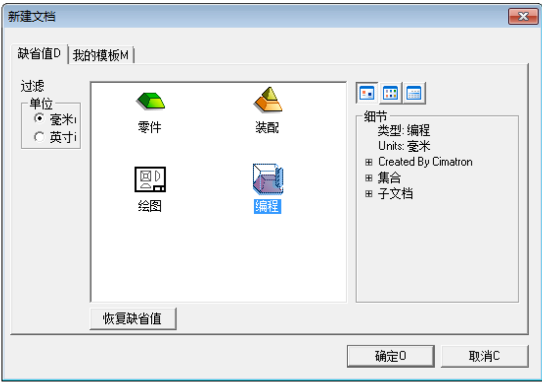


图 4-71　“新建文档”对话框

2）调入模型，具体操作步骤如下：

- 单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“yepian.elt”（“随书光盘：\Chapter04\4.3\uncompleted\yepian.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。
- 单击“Feature Guide”对话框的确定按钮，完成模型调入，如图 4-72 所示。

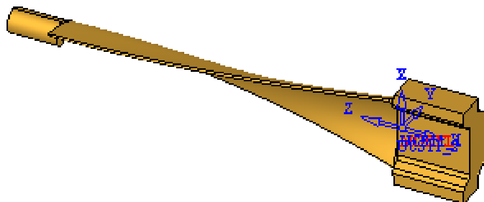


图 4-72　调入模型

2. 创建刀具

1）创建 D16R4 的圆角刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 4-73 所示。

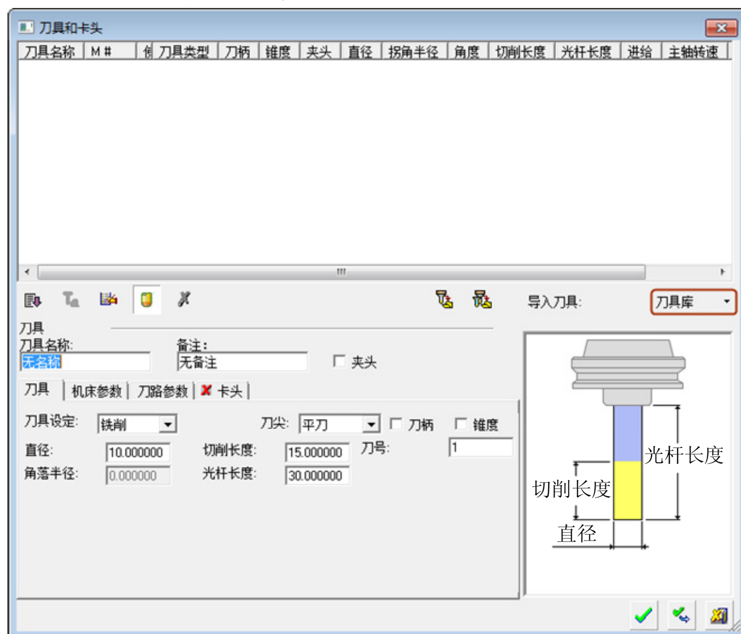


图 4-73　“刀具和卡头”对话框（1）

- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-74 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

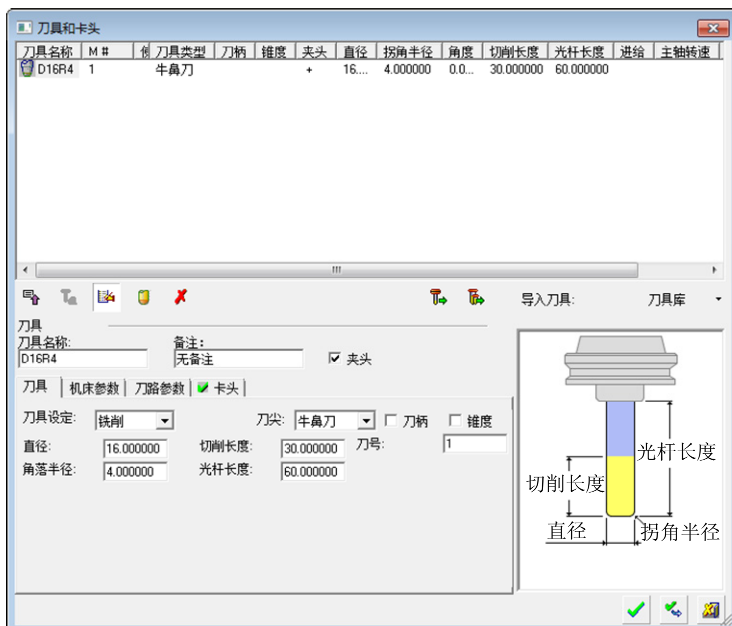


图 4-74 “刀具库”对话框

2）创建 B10 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框；单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 4-75 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

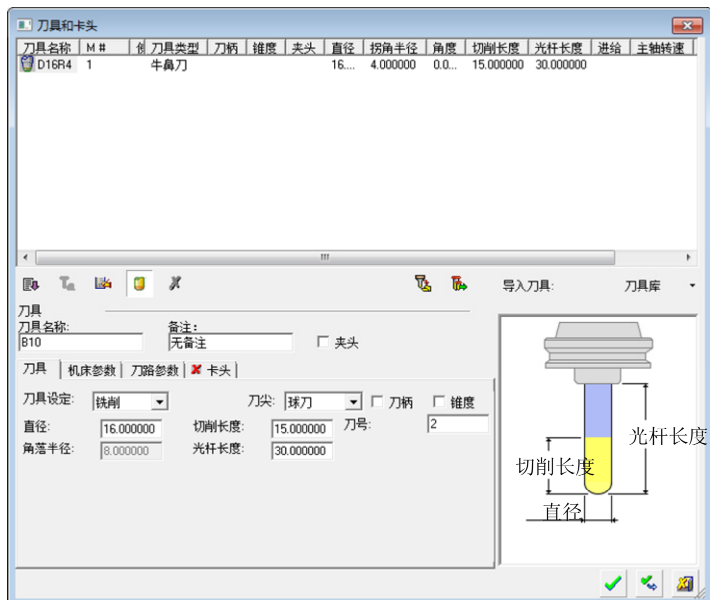


图 4-75 创建 B10 球刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“4 轴”，UCS 选择“MODEL”，“旋转轴”为“X 轴”，安全平面 Z 为“150”，如图 4-76 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。

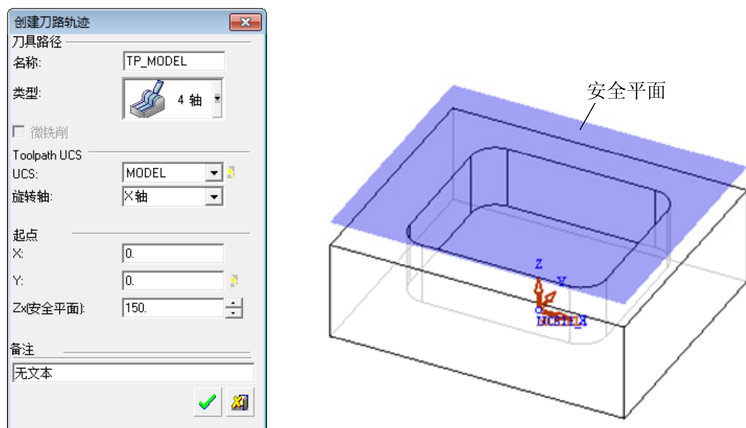


图 4-76　“创建刀路轨迹”对话框

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮创建零件，如图 4-77 所示。

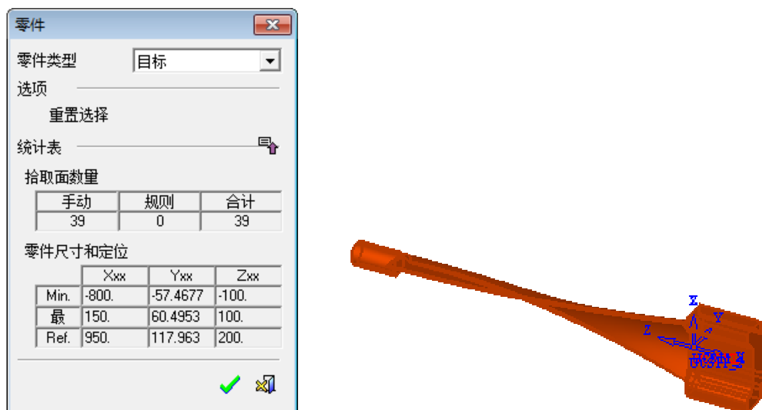


图 4-77　创建零件

5. 创建毛坯

单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，

设置“毛坯类型”为“矩形”，第一角点（–700，–60，–90），第二角点（5，60，90）；单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 4–78 所示。



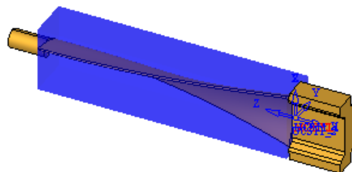


图 4–78 创建的毛坯

步骤二：航空铣四轴叶片粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 4–79 所示。



图 4–79 “NC Process Manager”对话框（1）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D16R4 牛鼻刀，如图 4–80 所示。

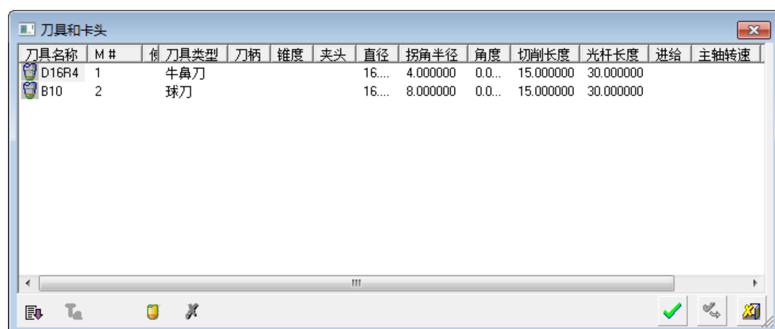


图 4-80 “刀具和卡头”对话框（2）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框，选择“工艺类型”为“两曲线之间仿形铣”；设置其他参数如图 4-81 所示。

- 在“曲线编辑”框中单击“第一”按钮，选择如图 4-82 所示的曲线为第一曲线，然后单击鼠标中键确定；单击“第二”按钮，选择如图 4-83 所示的曲线为第二曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框（1）。

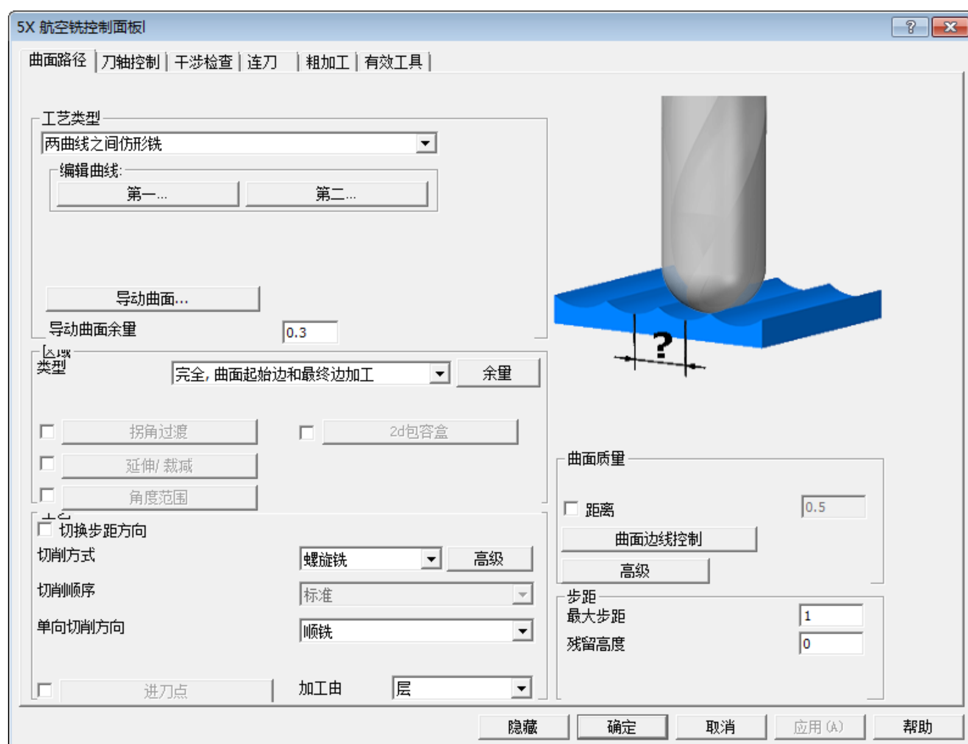


图 4-81 “5X 航空铣控制面板”对话框（1）

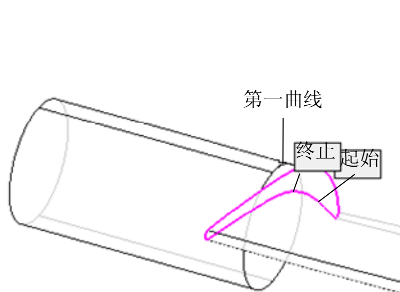


图 4-82　选择第一曲线（1）

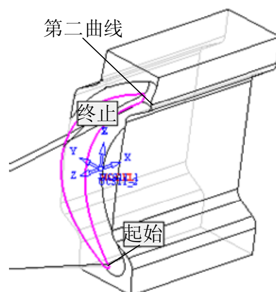


图 4-83　选择第二曲线（1）

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 4-84 所示的曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

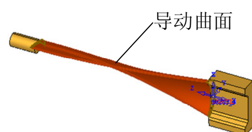


图 4-84　选择导动曲面（1）

4）设置刀轴，具体操作步骤如下：

- 选择“刀轴控制”选项卡（1），选择“输出格式”为“4 轴”，设置“最大角度步距”为“3”，如图 4-85 所示。

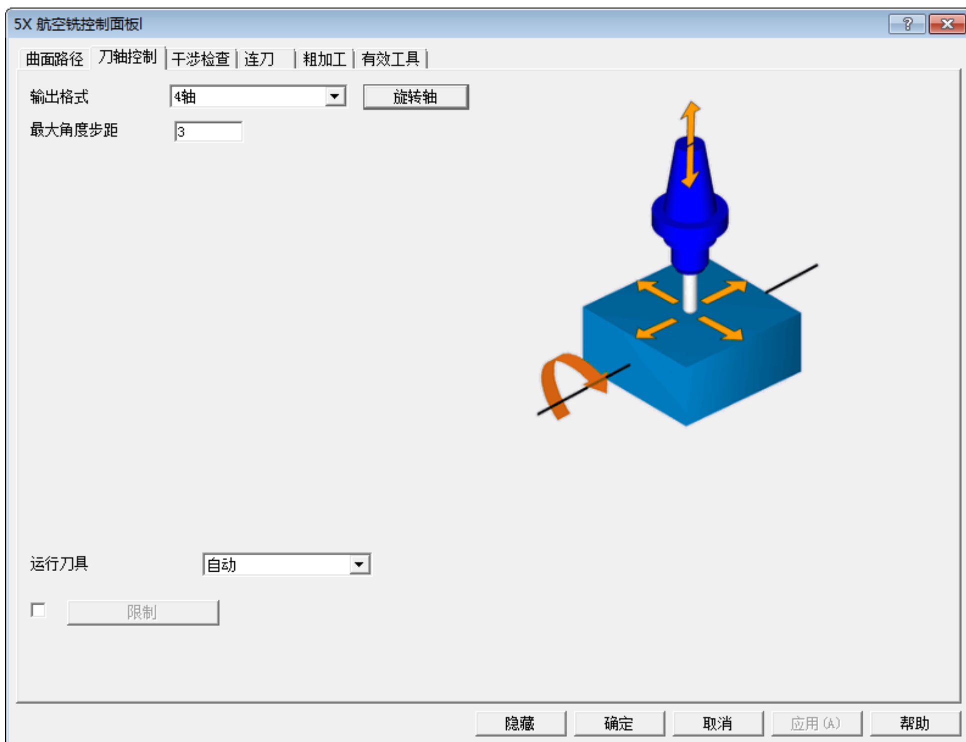


图 4-85　“刀轴控制”选项卡（1）

- 单击“旋转轴”按钮，选择“X 轴”为“第 4 轴”，勾选“指定刀具旋转轴”复选框（1），如图 4-86 所示。单击“确定”按钮返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

5）选择“连刀”选项卡（1），选择“小间隙”为“直接”，“大间隙”为“沿曲面”；设置其他参数如图 4-87 所示。

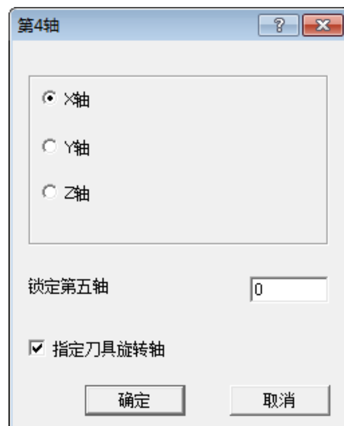


图 4-86　指定刀具旋转轴（1）

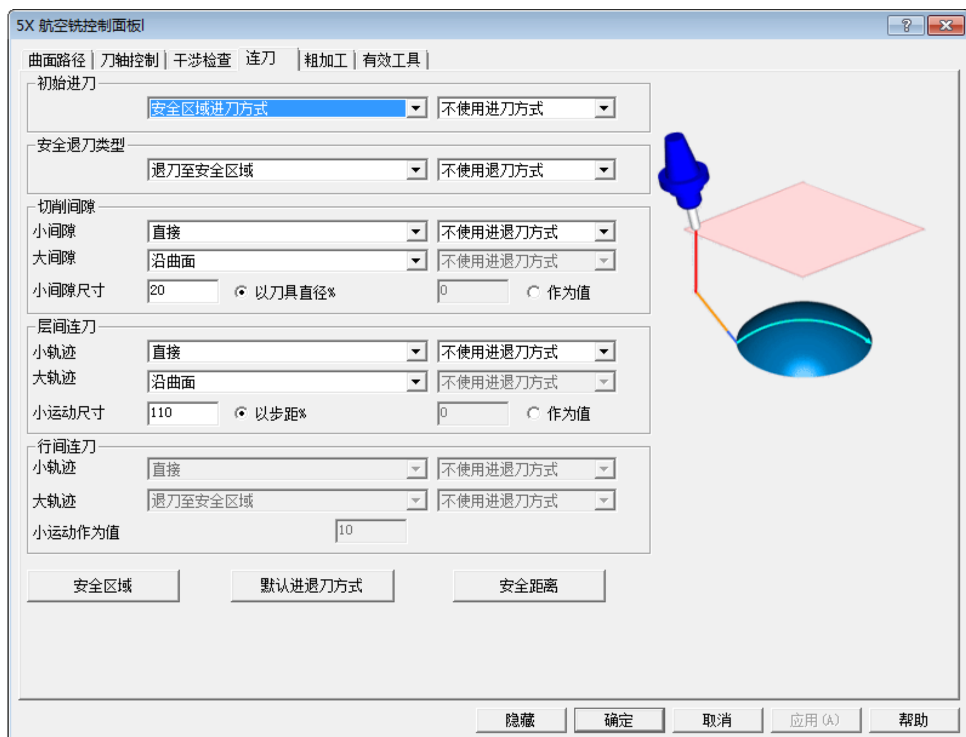


图 4-87　“连刀”选项卡（1）

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，设置相关参数如图 4-88 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-89 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	753.9822
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 4-88　设置机床参数（1）

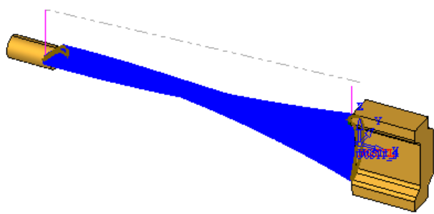


图 4-89　生成的刀具路径（1）

步骤三：航空铣四轴叶片精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 4-90 所示。

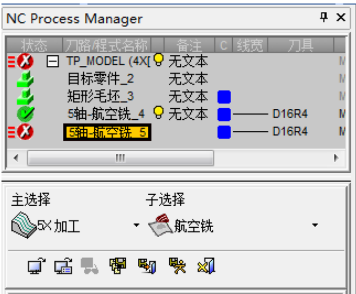


图 4-90　“NC Process Manager”对话框（2）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B10 球刀，如图 4-91 所示。

刀具和卡头

刀具名称	M #	[illegible]	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D16R4	1	!	牛鼻刀				16....	4.000000	0.0...	15.000000	30.000000		
B10	2		球刀				16....	8.000000	0.0...	15.000000	30.000000		

图 4-91　“刀具和卡头”对话框（3）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框，选择“工艺类型”为“两曲线之间仿形铣”；设置其他参数如图 4-92 所示。

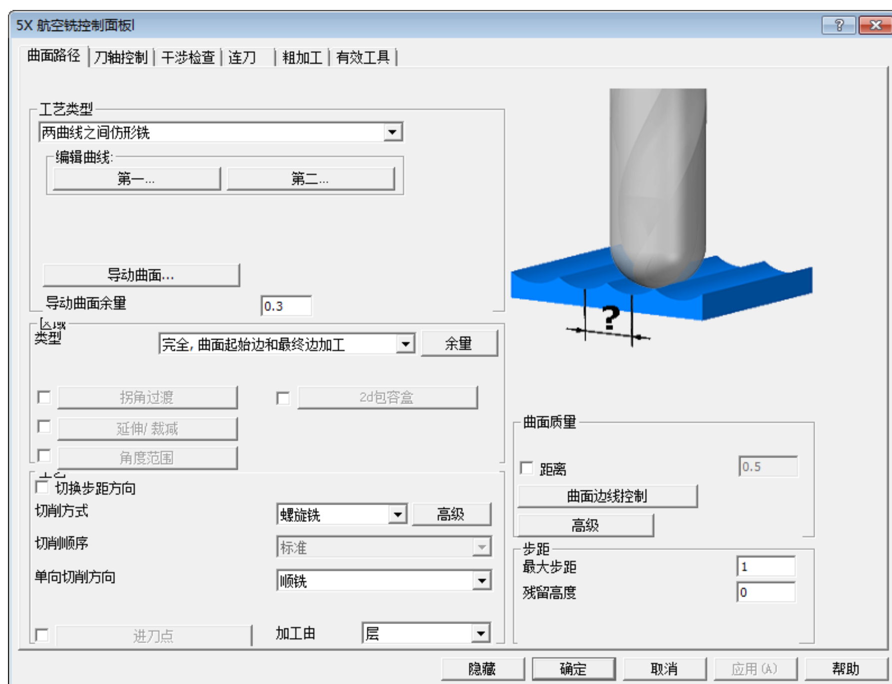


图 4-92　“5X 航空铣控制面板”对话框（2）

- 在“曲线编辑”框中单击“第一”按钮，选择如图 4-93 所示的曲线为第一曲线，然后单击鼠标中键确定；单击“第二”按钮，选择如图 4-94 所示的曲线为第二曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

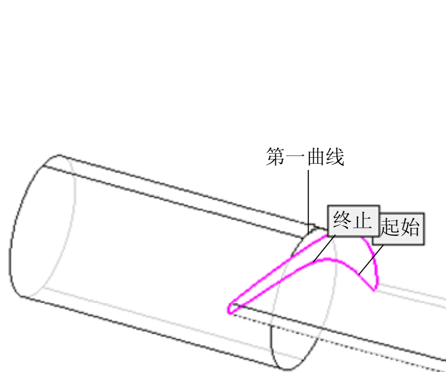


图 4-93　选择第一曲线（2）

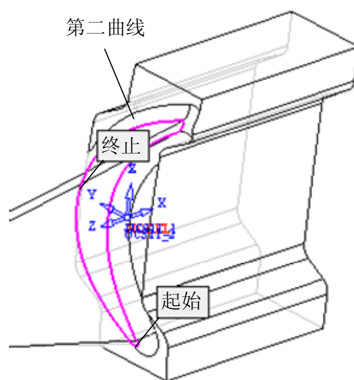


图 4-94　选择第二曲线（2）

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 4-95 所示的曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

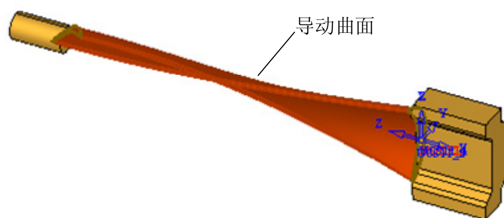


图 4-95 选择导动曲面（2）

4）设置刀轴，具体操作步骤如下：

- 选择“刀轴控制”选项卡，选择“输出格式”为“4 轴”，设置“最大角度步距”为“3”，如图 4-96 所示。

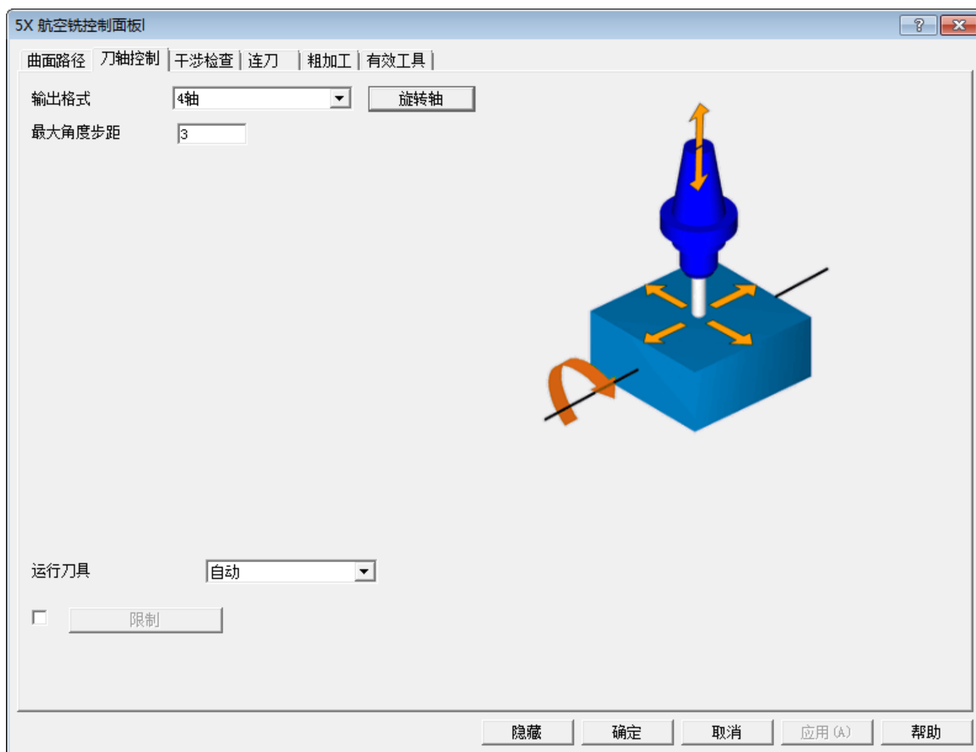


图 4-96 “刀轴控制”选项卡（2）

- 单击“旋转轴”按钮，选择“X 轴”为“第 4 轴”，勾选“指定刀具旋转轴”复选框（2），如图 4-97 所示。单击“确定”按钮，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

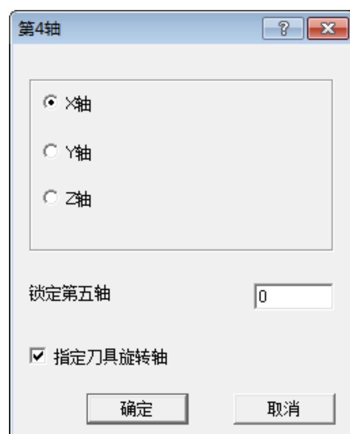


图 4-97　指定刀具旋转轴（2）

5）选择“连刀”选项卡（2），选择“小间隙”为“直接”，“大间隙”为“沿曲面”；设置其他参数如图 4-98 所示。

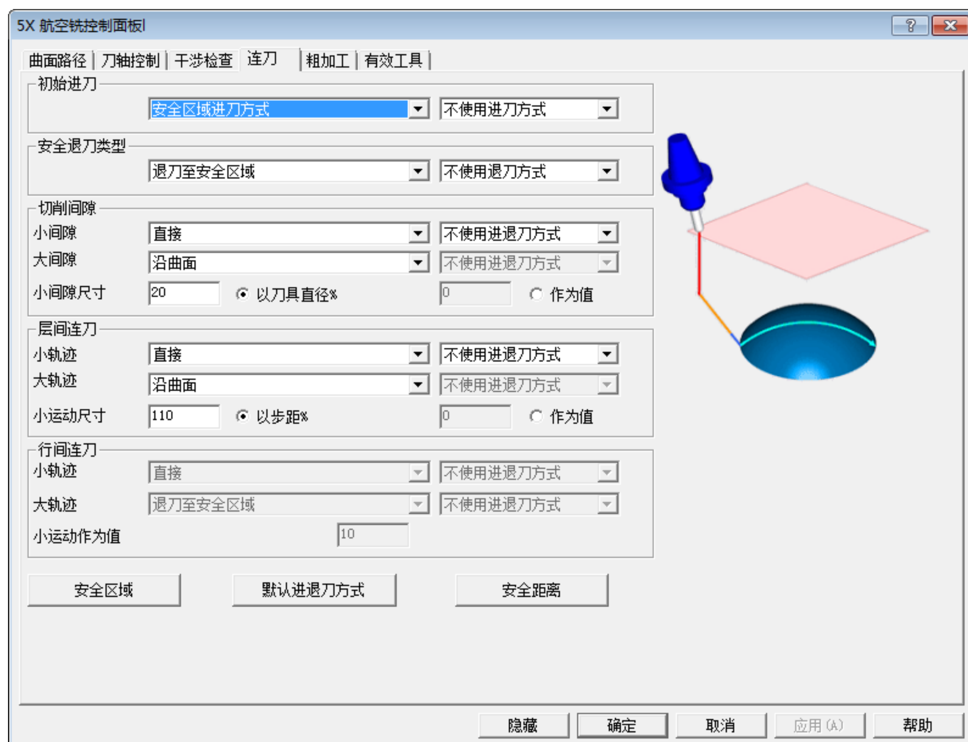


图 4-98　“连刀”选项卡（2）

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 4-99 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 4-100 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	1005.3096
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	8000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 4-99　设置机床参数（2）

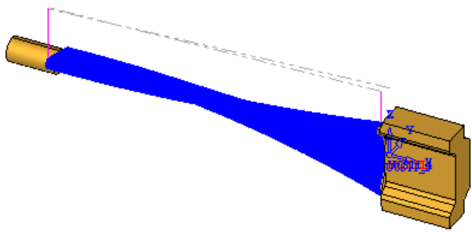


图 4-100　生成的刀具路径（2）

4.3.5　实例总结

本节讲解了叶片零件 Cimatron E9.0 航空铣四轴高速加工的方法和具体步骤，读者在学习过程中要注意的是：航空铣四轴加工包括多种加工工艺方法，常用的有“平行铣”，通过改变 XY 和 ZX 两个基准平面内的角度定义刀轨切削方向；“两曲线之间仿形铣”通过指定两条曲线控制刀具路径的起始与终止边界，生成的刀具路径在两条曲线之间过渡。通过选择合适的加工方式可以充分发挥航空铣四轴加工功能，达到较好的加工效果。

第 5 章　Cimatron E9.0 五轴高速加工实例

五轴加工过程比三轴和四轴加工的过程都复杂，该项技术的难点在于需要加工刀具能够在五个自由度上进行定位和连接。本章按照由浅入深的原则，结合 3 个具体实例来讲解 Cimatron E9.0 在五轴高速加工中的应用。

5.1　入门实例——瓶身零件五轴高速加工

5.1.1　实例描述

瓶身零件如图 5-1 所示。整个零件由外圆柱面、圆柱面上的凹槽组成。材料为淬硬工具钢，表面加工粗糙度为 *Ra*0.8μm，采用五轴加工机床进行加工。

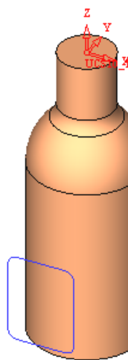


图 5-1　瓶身零件

5.1.2　加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，瓶身零件采用的工艺路线为“外表面粗加工”→“外

表面精加工”→“凹槽加工”。瓶身零件高速数控加工切削参数见表 5-1。

表 5-1 瓶身零件高速数控加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向吃刀量/mm	径向吃刀量/mm	主轴转速 *n*/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
8	2	—	—	20000	5000	粗加工
6	2	0.3	0.3	30000	8000	精加工
2	2	0.5	—	60000	8500	精加工

1）外表面加工。外表面加工利用电极 4+1 轴进行粗、精加工，设置刀轴为“固定倾斜角度”，与 Z 轴倾斜 30°，刀轴交叉于倾斜轴，粗加工采用 B8 球刀，精加工采用 B6 球刀。

2）凹槽加工。凹槽加工采用雕刻五轴加工，设置“多行开粗”，在深度方向上加工 4 次，铣削吃刀量为 1mm，刀具采用 B2 的球刀。

5.1.3 加工流程与所用知识点

瓶身零件数控加工具体的设计流程和知识点，如表 5-2 所示。

表 5-2 瓶身零件数控加工具体的设计流程和知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择适用的刀具	光杆长度 切削长度 直径

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 3： 创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	
Step 4： 创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	
Step 5： 创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6： 电极五轴粗加工外表面	电极加工主要用于“3 轴”无法加工需要多轴联动的电极加工，它简化了航空铣电极类零件加工编程	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step7：电极五轴精加工外表面	电极加工主要用于“3 轴”无法加工需要多轴联动的电极加工，它简化了航空铣电极类零件加工编程	
Step8：雕刻五轴凹槽加工	雕刻加工用于在倾斜面或曲面上的文字和花纹的加工	

5.1.4 具体操作步骤

步骤一：加工准备

1. 进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 5-2 所示。单击“确定”按钮，进入编程界面。

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“pingzi.elt”（“随书光盘：\Chapter05\5.1\uncompleted\pingzi.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 5-3 所示。

2. 创建刀具

1）创建 B8 的球刀，具体步骤如下：

● 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对

话框（1），如图 5-4 所示。



图 5-2 “新建文档”对话框

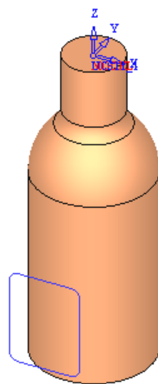


图 5-3 调入模型

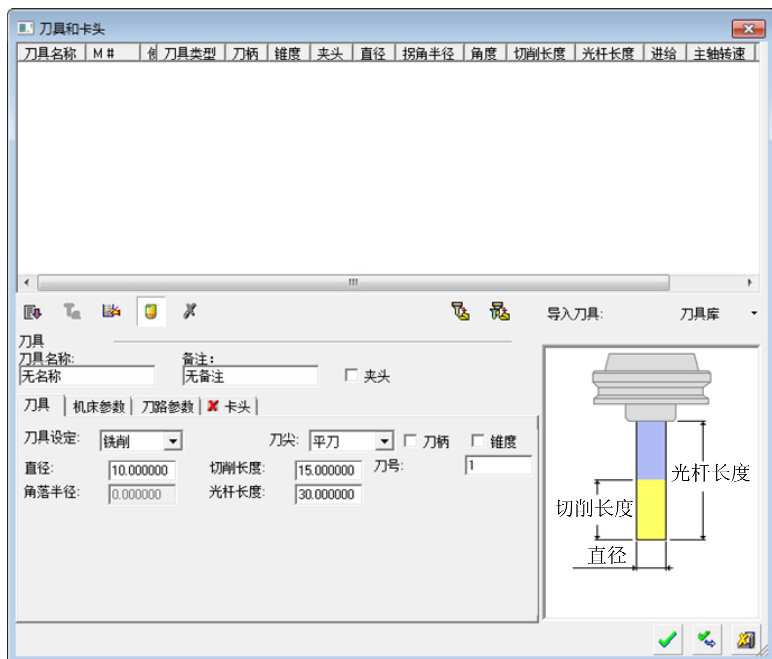


图 5-4 “刀具和卡头”对话框（1）

- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-5 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

2）创建 B6 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-6 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

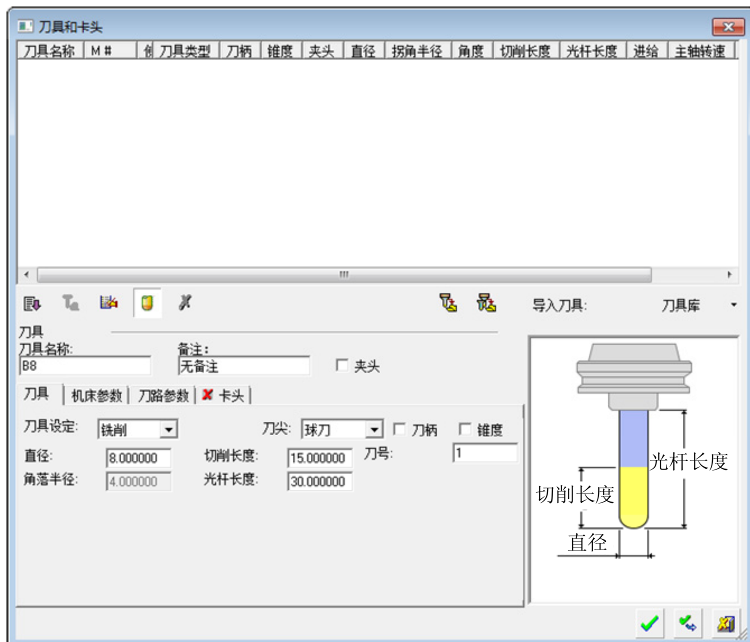


图 5-5 “刀具库”对话框

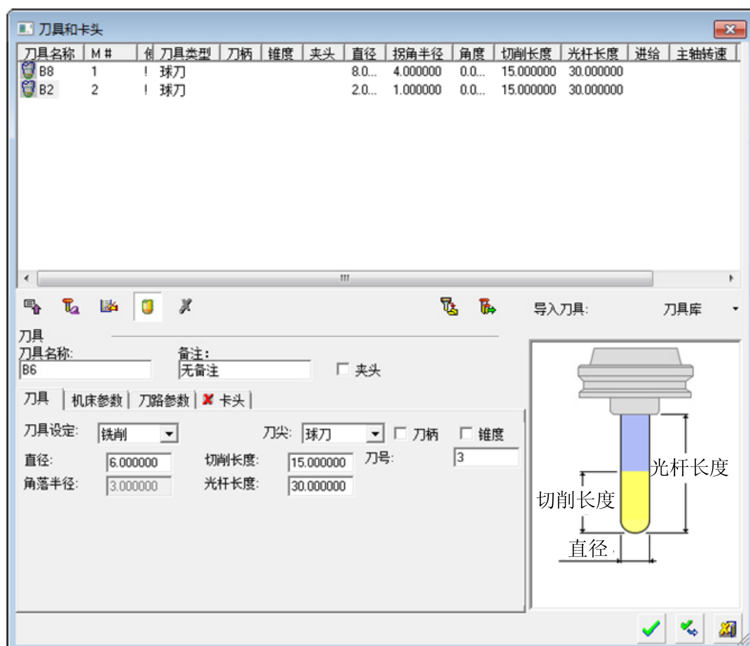


图 5-6 创建 B6 球刀

3）创建 B2 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀

具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-7 所示。依次单击确定按钮✓，完成刀具创建。

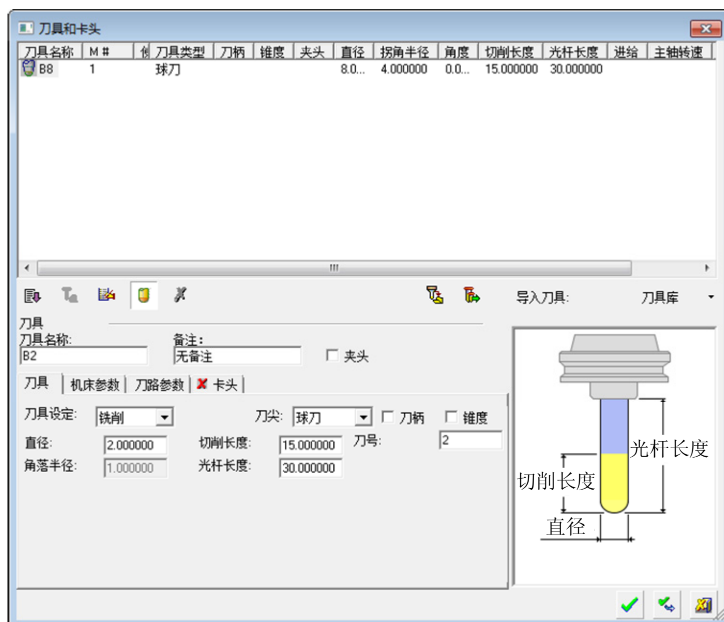


图 5-7　创建 B2 球刀

3．创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置刀具路径类型为“5 轴”，UCS 选择“MODEL”，安全平面 Z 为“50”，如图 5-8 所示。单击确定按钮✓，完成刀路轨迹的创建。

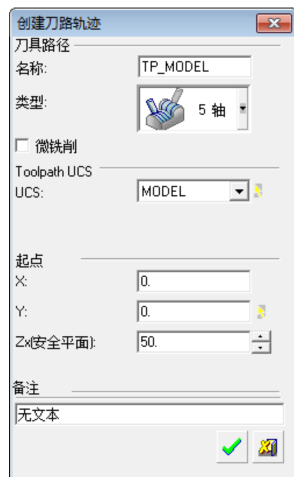


图 5-8　“创建刀路轨迹”对话框

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮计算零件，如图 5-9 所示。



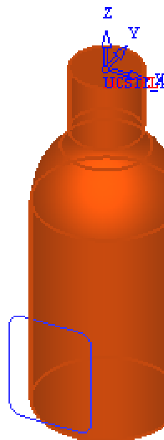
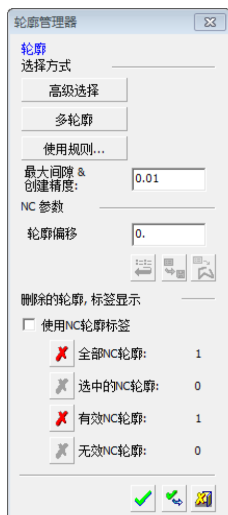


图 5-9　创建零件

5. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 5-10 所示的模型边线，单击鼠标中键返回；单击确定按钮返回“初始毛坯”对话框。



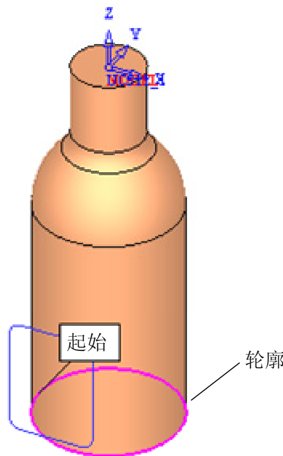


图 5-10　选择轮廓

2）在“Z-顶部”文本框中输入“0.000000”，“Z-底部”文本框中输入“–160.000000”，“轮廓偏移”为“5”；单击确定按钮，完成毛坯的创建，如图 5-11 所示。

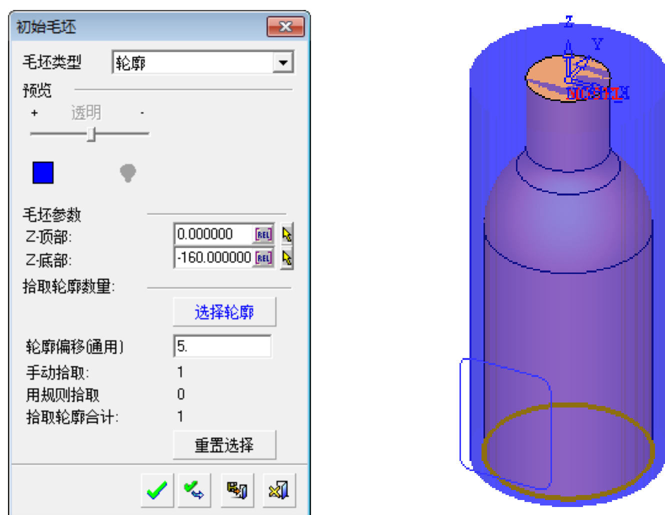


图 5-11　创建的毛坯

步骤二：电极五轴粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“电极加工”，如图 5-12 所示。

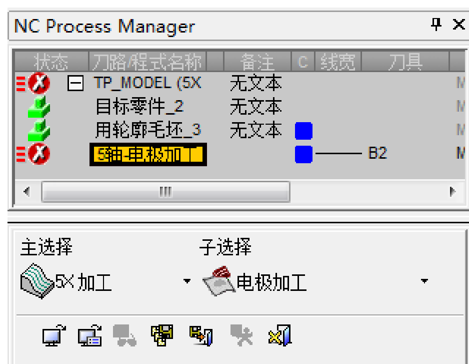


图 5-12　“NC Process Manager”对话框（1）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 B8 球刀，如图 5-13 所示。

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“电极（4+1X）控制面板”对话框，设置相关参数如图 5-14 所示。

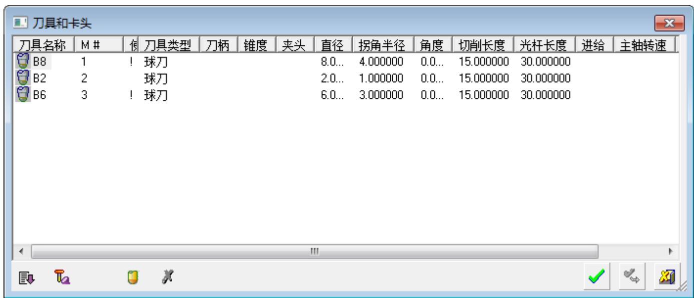


图 5-13 “刀具和卡头”对话框（2）

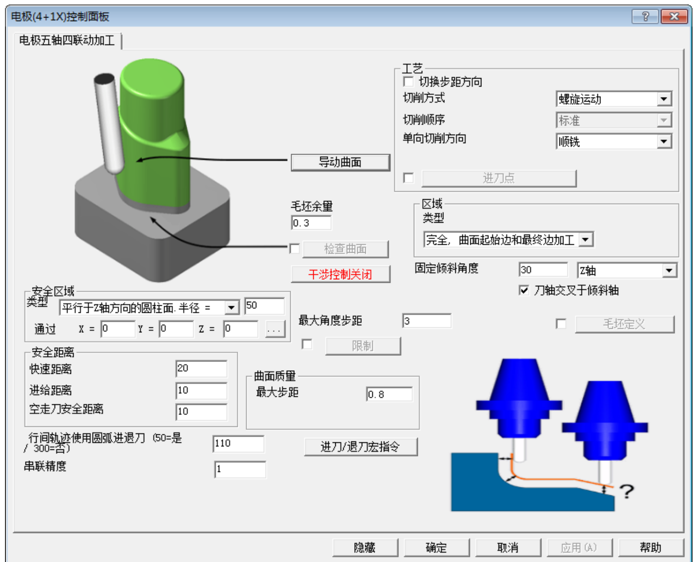


图 5-14 “电极（4+1X）控制面板”对话框（1）

● 单击“导动曲面”按钮，选择如图 5-15 所示的瓶子外曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“电极（4+1X）控制面板”对话框（1）。



图 5-15 选择导动曲面（1）

- 单击“进刀/退刀宏指令”按钮，弹出“默认进退刀方式”对话框（1），设置相关参数，如图 5-16 所示；单击“确定”按钮完成进退刀设置。

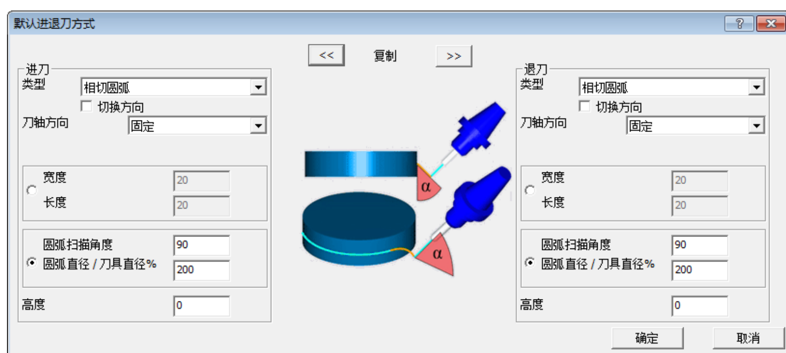


图 5-16 “默认进退刀方式”对话框（1）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-17 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 5-18 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-19 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	502.6548
主轴转速	20000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-17　设置机床参数（1）

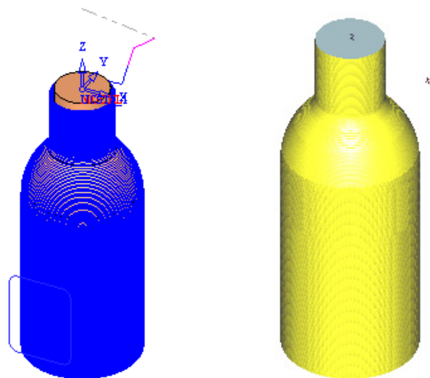


图 5-18　生成的刀具路径（1）　图 5-19　仿真模拟结果（1）

步骤三：电极五轴精加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“电极加工”，如图 5-20 所示。

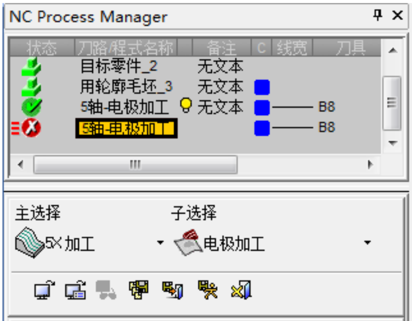


图 5-20 “NC Process Manager”对话框（2）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B6 球刀，如图 5-21 所示。

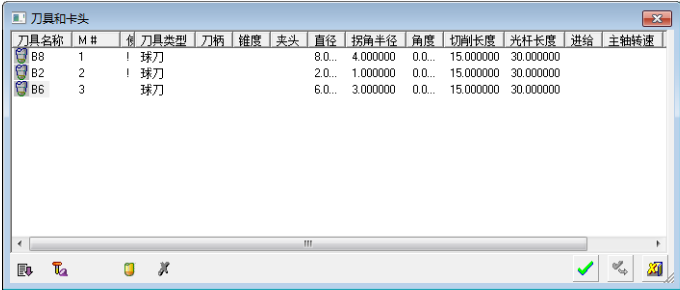


图 5-21 “刀具和卡头”对话框（3）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“电极（4+1X）控制面板”对话框（2），设置相关参数如图 5-22 所示。

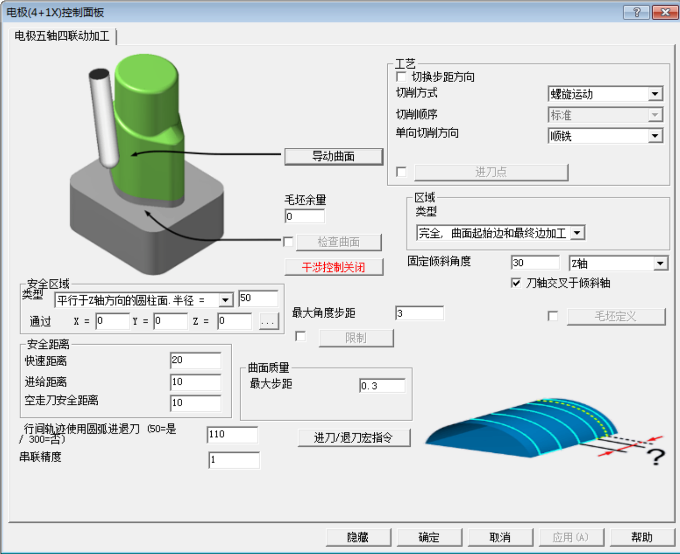


图 5-22 “电极（4+1X）控制面板”对话框（2）

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 5-23 所示的瓶子曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“电极（4+1X）控制面板”对话框。



图 5-23　选择导动曲面（2）

- 单击“进刀/退刀宏指令”按钮，弹出“默认进退刀方式”对话框（2），设置相关参数如图 5-24 所示；单击“确定”按钮完成进退刀设置。

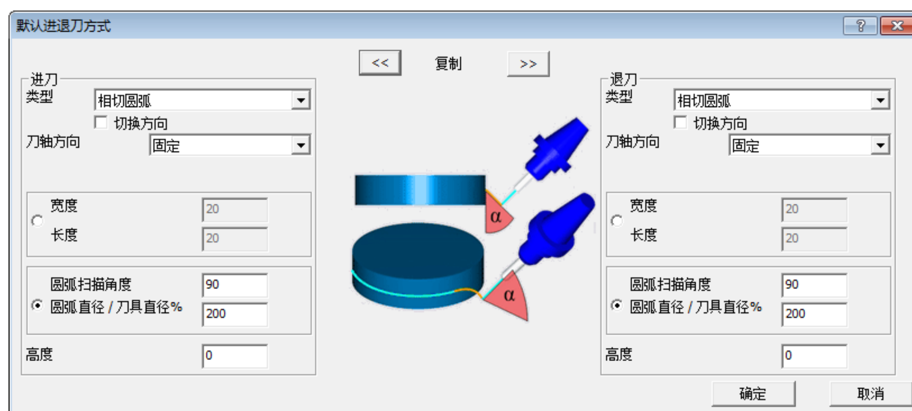


图 5-24　“默认进退刀方式”对话框（2）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-25 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	565.4867
主轴转速	30000
进给(毫米/分钟)	8000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-25　设置机床参数（2）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-26 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-27 所示。

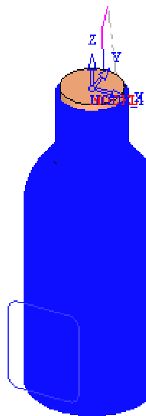


图 5-26　生成的刀具路径（2）



图 5-27　仿真模拟结果（2）

步骤四：曲面雕刻五轴加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“雕刻”，如图 5-28 所示。

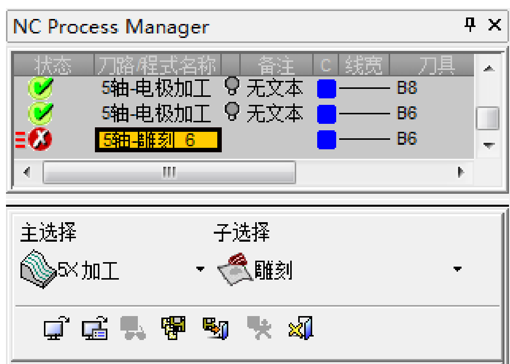


图 5-28　“NC Process Manager”对话框（3）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B2 球刀，如图 5-29 所示。

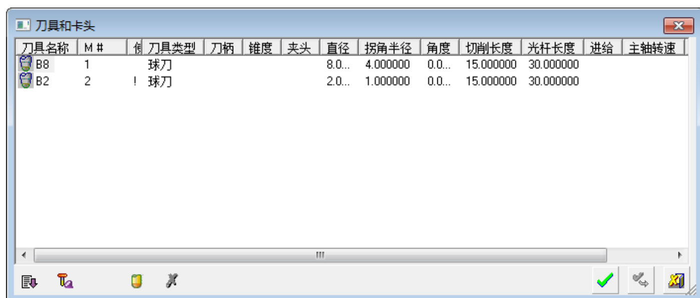


图 5-29 “刀具和卡头”对话框（4）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“雕刻控制面板”对话框，设置相关参数如图 5-30 所示。

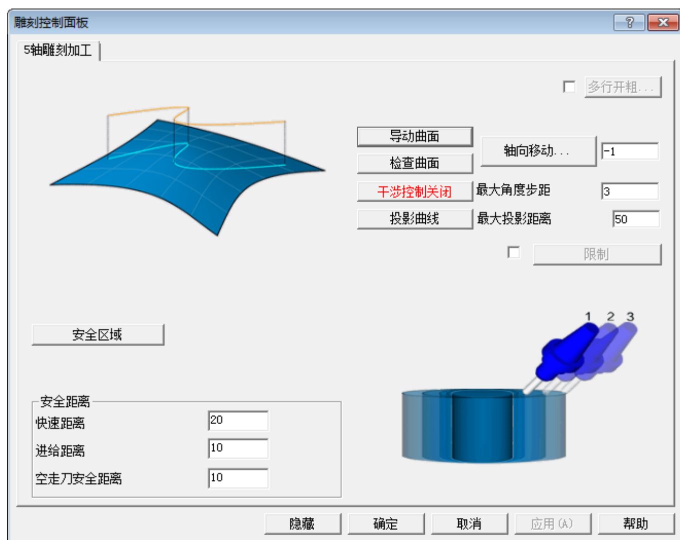


图 5-30 “雕刻控制面板”对话框

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 5-31 所示的曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“雕刻控制面板”对话框。
- 单击“投影曲线”按钮，选择如图 5-32 所示的曲线作为投影曲线，单击鼠标中间确定，返回“雕刻控制面板”对话框。
- 勾选“多行开粗”复选框，单击该按钮，弹出“多行开粗”对话框，设置参数如图 5-33 所示。单击“确定”按钮返回“雕刻控制面板”对话框。

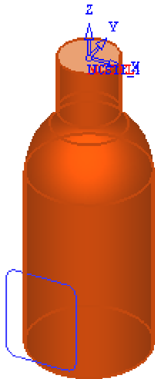


图 5-31 选择导动曲面（3）

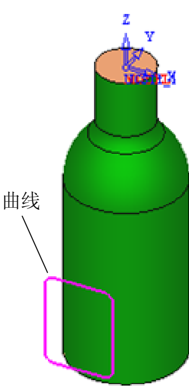


图 5-32 选择投影曲线

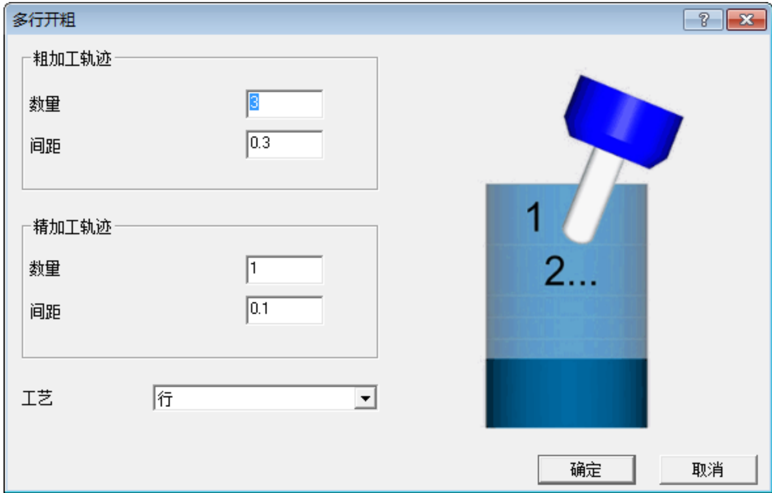


图 5-33 “多行开粗”对话框

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-34 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	1130.9734
主轴转速	60000
进给(毫米/分钟)	8500.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-34 设置机床参数（3）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 5-35 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-36 所示。

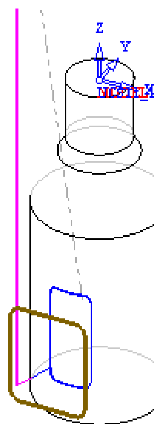


图 5-35　生成的刀具路径（3）

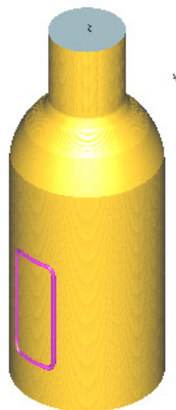


图 5-36　仿真模拟结果（3）

5.1.5　实例总结

本节以瓶身零件为例讲解了 Cimatron E9.0 电极五轴、雕刻五轴加工方法和具体应用步骤，读者在学习过程中要注意下面两点：

1）电极五轴加工用于三轴无法加工、需要多轴联动的电极类零件加工，它简化了航空铣对该类零件编程参数设置，提高了编程效率。

2）雕刻五轴加工用于在倾斜面或曲面上的文字和花纹的加工，它可以将文字或图案以曲面垂直的方式镶嵌在曲面上。

5.2　提高实例——航空零件五轴高速加工

5.2.1　实例描述

航空零件如图 5-37 所示。整个零件有三个凹腔，凹腔侧边有 5° 的拔模斜度。材料为淬硬工具钢，表面加工粗糙度为 Ra0.8μm，采用五轴加工机床进行加工。

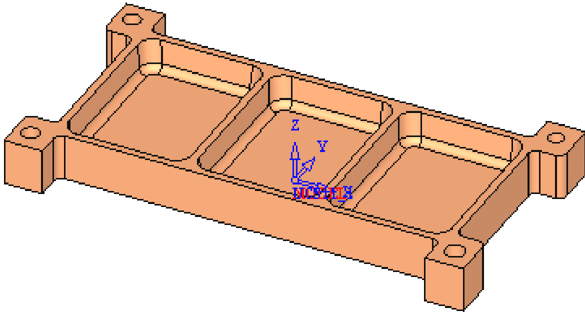


图 5-37 航空零件

5.2.2 加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，本例采用工艺路线为“粗加工”→“半精加工”→“精加工”。航空零件高速数控加工中所用到的切削参数，见表 5-3。

表 5-3 航空零件高速数控加工的切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 n /（r/min）	进给率 /（mm/min）	加工方式
16	2	—	—	8000	3000	粗加工
8	2	0.3	0.3	10000	8000	半精加工
8	2	0.3	0.3	10000	5000	精加工

1）粗加工。首先采用较大直径的刀具进行粗加工以便于去除大量多余留量，粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具为ϕ16mm、R4mm 的牛鼻刀。

2）半精加工。半精加工采用曲面铣限制角度精铣方式，通过限制角度为 33°来加工垂直区域，垂直区域采用层切方式，刀具为直径ϕ8mm 的球刀。

3）精加工。对水平区域采用精铣、环切，由内向外方式走刀，顺铣加工；刀具为直径ϕ8mm 的球刀；侧壁采用五轴侧刃铣加工，提高该类零件的加工质量和加工效率。

5.2.3 加工流程与所用知识点

航空零件数控加工具体的设计流程和知识点，如表 5-4 所示。

表 5-4 航空零件数控加工具体的设计流程和知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1： 导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2： 创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，应根据加工需要选择适用的刀具	
Step 3： 创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	
Step 4： 创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	
Step 5： 创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step6： 体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在Z方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	
Step7： 曲面铣限制角度半精加工垂直区域	限制角度精铣将选择曲面加工部位进行陡峭检查，区分为水平区域和垂直区域，并对不同性质的区域采用不同的加工技术	
Step8： 曲面铣精铣水平区域加工分型面	精铣水平区域用于精加工水平面，生成的刀具路径只加工在同一水平面的曲面加工区域	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step9：五轴侧刃铣加工中间凹腔侧壁	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削，加工倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	
Step10：五轴侧刃铣加工左侧凹腔侧壁	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削，加工倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	
Step11：五轴侧刃铣加工右侧凹腔侧壁	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削，加工倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	

5.2.4 具体操作步骤

步骤一：加工准备

1．进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 5-38 所示。单击“确定”按钮进入编程界面。



图 5-38 “新建文档”对话框

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏中的“调入模型”按钮，选择“hangkongkuang.elt”（“随书光盘：\Chapter05\5.2\uncompleted\hangkongkuang.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮，完成模型调入，如图 5-39 所示。

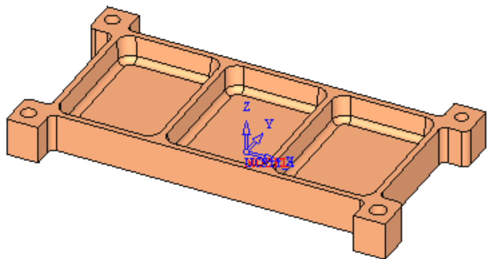


图 5-39 调入模型

2．创建刀具

1）创建 D16mm、*R*4mm 的牛鼻刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 5-40 所示。

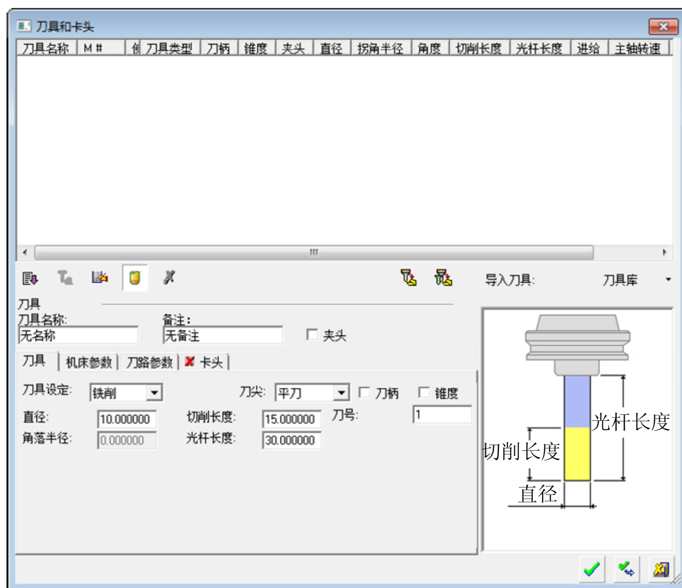


图 5-40　“刀具和卡头”对话框（1）

- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-41 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

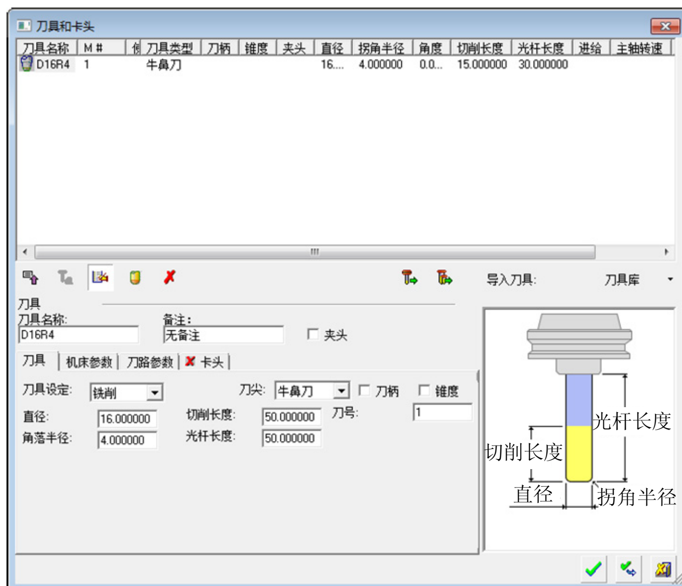


图 5-41　“刀具库”对话框

2）创建 B8 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-42 所示。依次单击确定按钮，完成刀具创建。

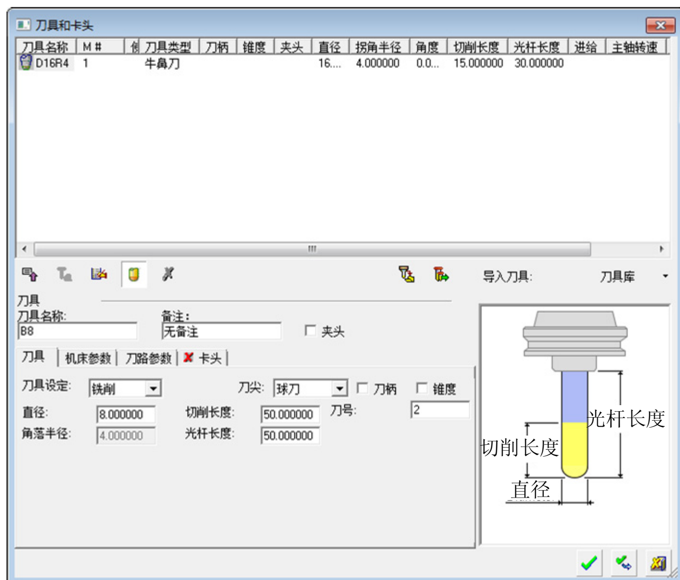


图 5-42　创建 B8 球刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“修改刀具路径”对话框，设置刀具路径类型为“5 轴”，UCS 选择“MODEL”，安全平面 Z 为“80”，如图 5-43 所示。单击确定按钮，完成刀路轨迹的创建。



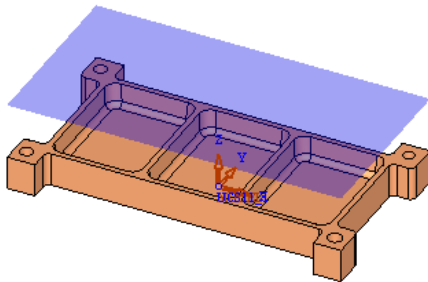


图 5-43　“修改刀具路径”对话框

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮计算零件，如图 5-44 所示。



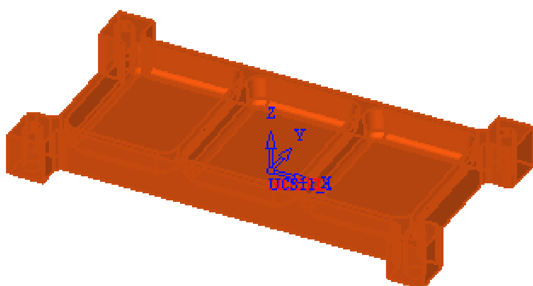


图 5-44　创建零件

5. 创建毛坯

单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“矩形”，分别输入第一角点和第二角点坐标；单击确定按钮完成毛坯创建，如图 5-45 所示。



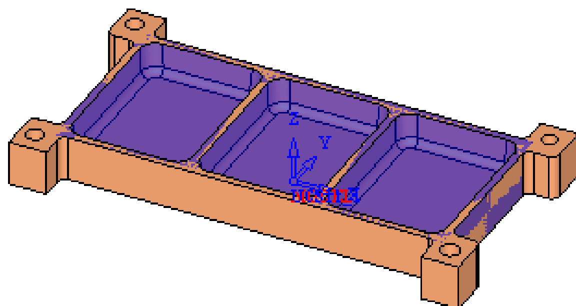


图 5-45　创建毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 5-46 所示。

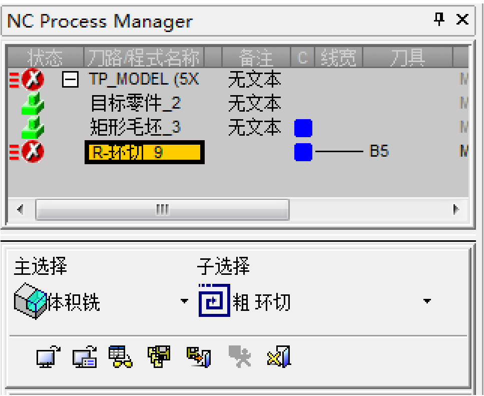


图 5-46　“NC Process Manager”对话框（1）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 5-47 所示。
- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为 89，如图 5-48 所示。

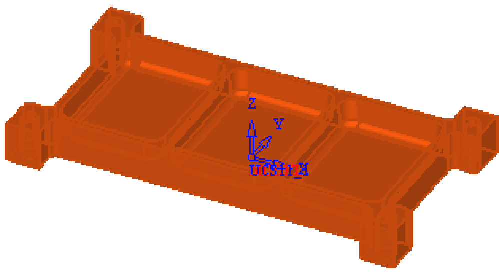
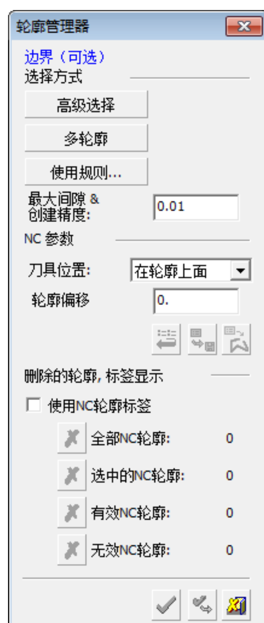


图 5-47　选择所有曲面（1）

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	89

图 5-48　“零件”选项（1）

- 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置“最大间隙&创建精度”为 0.01，“刀具位置”为“在轮廓上面”；选择如图 5-49 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。



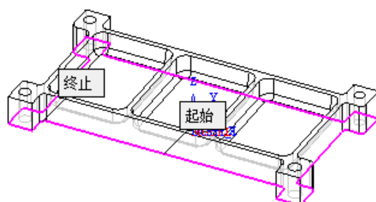


图 5-49　选择边界（1）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D16R4 牛鼻刀，如图 5-50 所示。

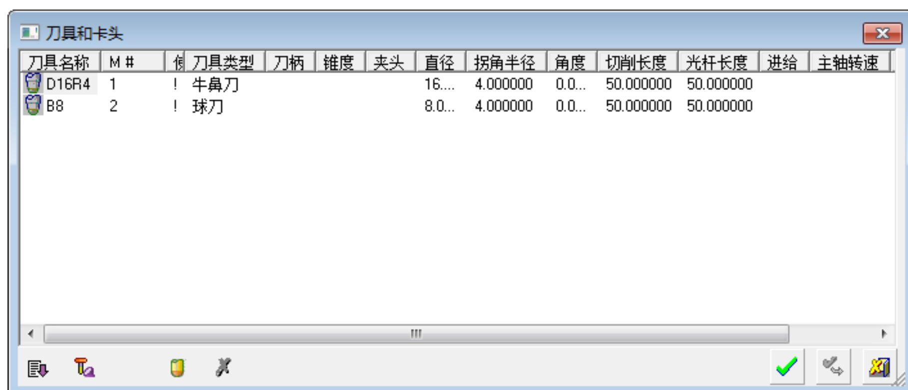


图 5-50　“刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中的“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5.0000”，如图 5-51 所示。

● 展开“刀路参数”选项中“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“12.0000”，如图 5-52 所示。

参数	值
安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	80.000000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5.0000
坐标系名称	MODEL

图 5-51 安全平面

参数	值
进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	12.0000
最小切削宽度	0.020000
最大螺旋半径	7.6800
螺纹铣	64.0000
进刀/推刀 - 轮廓外	☑

图 5-52 进刀和退刀点

● 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.6000”，“曲面精度”为“0.0100”，其他参数如图 5-53 所示。

● 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”、“策略”为“用户定义”，取消“策略：毛坯环切”复选框，“固定垂直步进”为“0.4000”、“侧向步长”为“1.0000”，选中“真环切”复选框、“加工由”为“区域”；其他参数如图 5-54 所示。

精度和曲面偏移	基本参
零件加工余量	0.6000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 5-53 精度和曲面偏移（1）

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	固定 + 水
固定垂直步进	0.4000
侧向步长	1.0000
真环切	☑
从安全平面到固定	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周围
为半精轨迹留余量	0.1000

图 5-54 刀路轨迹（1）

● 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 5-55 所示。

● 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项；其他参数如图 5-56 所示。

高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	1.0000
预设置的摆线半径	4.8000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	1.0000

图 5-55 高速铣（1）

清理行间间隙	高级参数
行间间隙策略	CBP &Ridges
圆角延伸	0.6000
有效范围半径	0.8400
最狭窄区域宽度	0.2400

图 5-56 清理行间间隙

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 5-57 所示。

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序，此时图形区显示的刀具路径如图 5-58 所示。

机床参数	
Vc(米/分钟)	402.1239
主轴转速	8000
进给(毫米/分钟)	3000.0000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 5-57　设置机床参数（1）

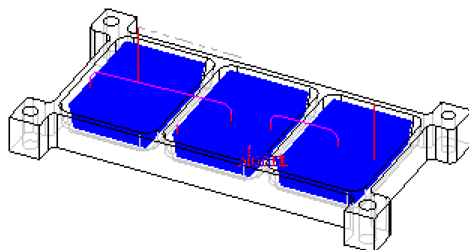


图 5-58　生成的刀具路径（1）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-59 所示。

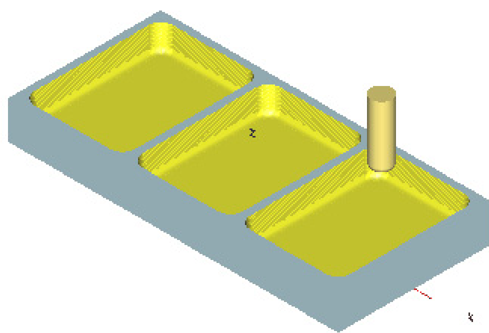


图 5-59　仿真模拟结果（1）

步骤三：曲面铣限制角度精铣半精加工垂直区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“限制角度精铣”，如图 5-60 所示。

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 5-61 所示。

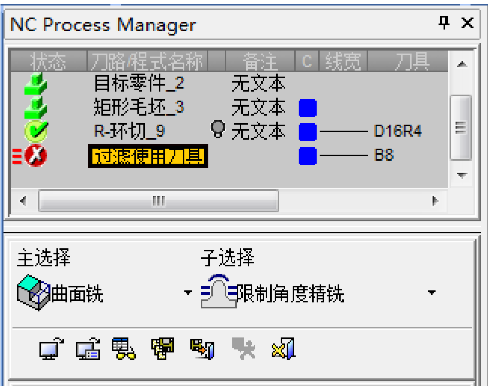


图 5-60 “NC Process Manager”对话框（2）

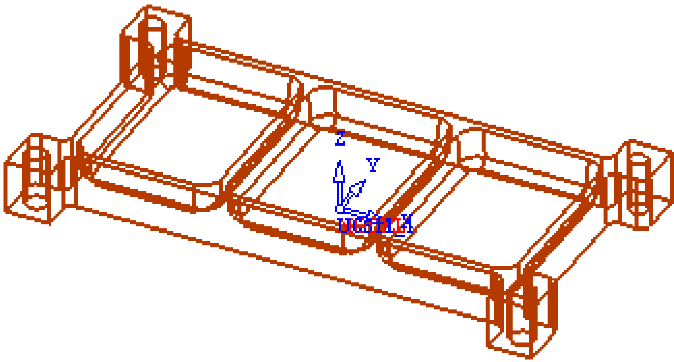


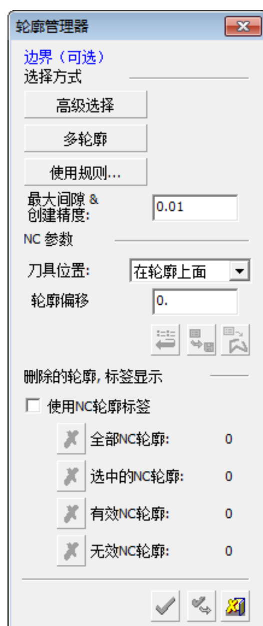
图 5-61 选择所有曲面（2）

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为“89”，如图 5-62 所示。

⊟ 零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	89
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 5-62 “零件”选项（2）

- 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置“最大间隙&创建精度”为“0.01”、“刀具位置”为“在轮廓上面”，选择如图 5-63 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。



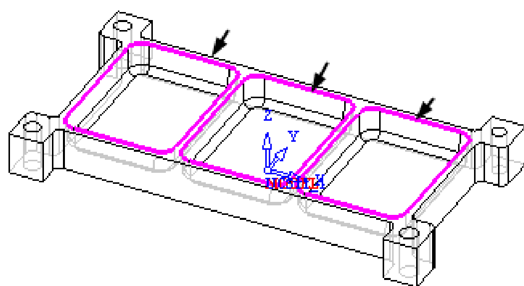


图 5-63　选择边界（2）



注意

每选择一条轮廓边界请单击鼠标中键确定。

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B8 球刀，如图 5-64 所示。

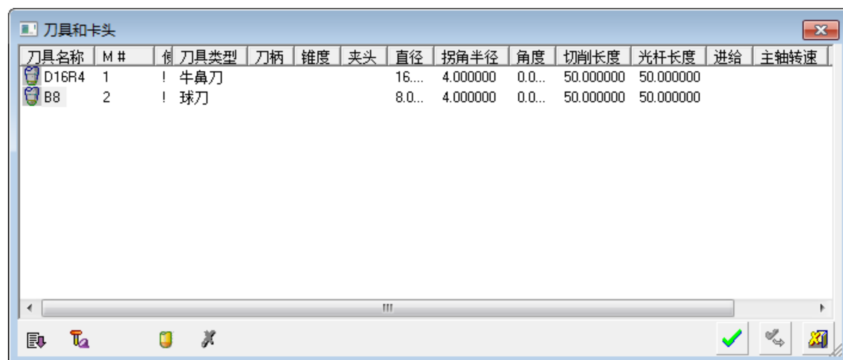


图 5-64　“刀具和卡头”对话框（3）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

● 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3”、“曲面

精度”为“0.0100”，其他参数如图 5-65 所示。

- 展开“刀路轨迹”选项，选中“垂直区域”复选框，取消“水平区域”复选框，设置“垂直加工策略”为“层”、“垂直步进”为“0.25”；其他参数如图 5-66 所示。

精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 5-65　精度和曲面偏移（2）

参数	值
刀路轨迹	
水平区域	☐
垂直区域	☑
垂直加工策略	层
垂直区域切削方向	顺铣
垂直步进	0.25
加工由	区域
限制角度	33.0000

图 5-66　刀路轨迹（2）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“垂直区域圆角”复选框；其他参数如图 5-67 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，其他相关参数设置如图 5-68 所示。

高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
垂直区域圆角	☑
垂直区域首选圆角	0.6000

图 5-67　高速铣（2）

机床参数	
Vc(米/分钟)	251.3274
主轴转速	10000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 5-68　设置机床参数（2）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-69 所示。

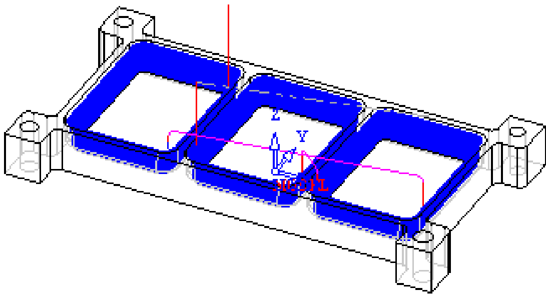


图 5-69　生成的刀具路径（2）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-70 所示。

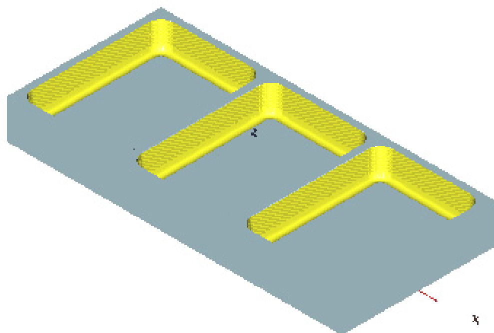


图 5-70　仿真模拟结果（2）

步骤四：曲面铣精铣水平区域加工平面区域

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“曲面铣”，“子选择”为“精铣水平区域”，如图 5-71 所示。

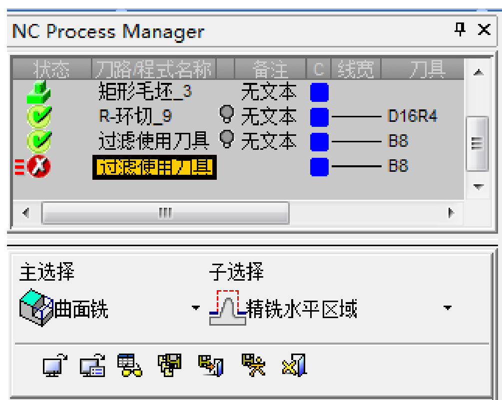


图 5-71　“NC Process Manager”对话框（3）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 5-72 所示。

● 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框，在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为 89，如图 5-73 所示。

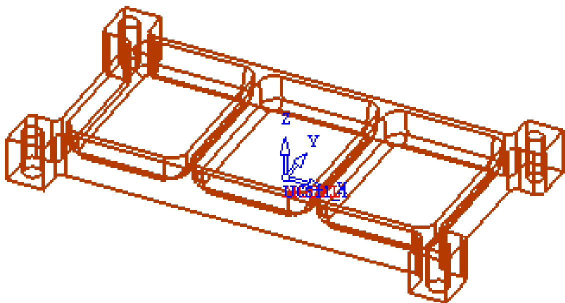
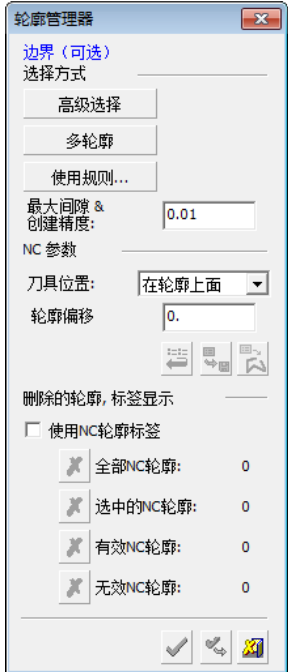


图 5-72　选择所有曲面（3）

零件	
边界（可选）	0
矩形 - 2点	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	89
检查曲面组数量	1
检查曲面	0

图 5-73　“零件”选项（3）

● 单击“边界”按钮，弹出“轮廓管理器”对话框，设置“最大间隙&创建精度”为“0.01”、“刀具位置”为“在轮廓上面”，选择如图 5-74 所示的轮廓作为边界，单击鼠标中键确认。



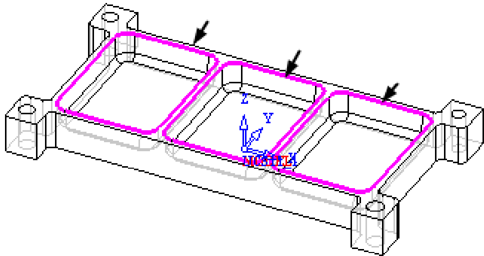
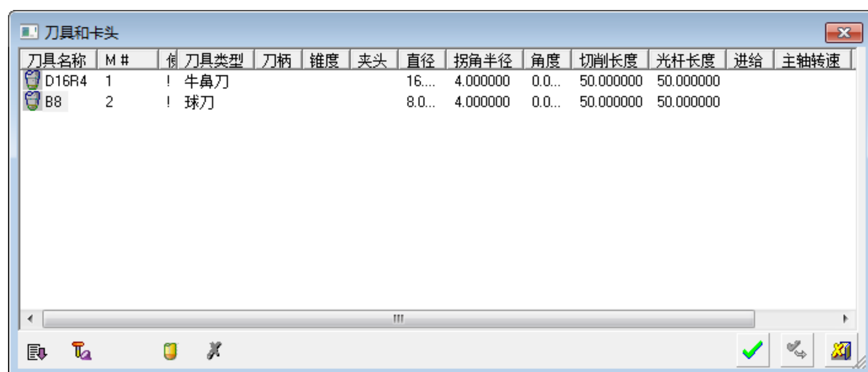


图 5-74　选择边界（3）

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B8 球刀，如图 5-75 所示。



刀具名称	M #	包	刀具类型	刀柄	锥度	夹头	直径	拐角半径	角度	切削长度	光杆长度	进给	主轴转速
D16R4	1	!	牛鼻刀				16....	4.000000	0.0...	50.000000	50.000000		
B8	2	!	球刀				8.0...	4.000000	0.0...	50.000000	50.000000		

图 5-75　“刀具和卡头”对话框（4）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0”、“曲面精度”为“0.0100”，其他参数如图 5-76 所示。
- 展开“刀路轨迹”选项，选择“水平加工方法”为“环切”，选择“水平区域切削方向”为“顺铣”，设置“水平步距”为“0.2000”，勾选“真环切”复选框；其他参数如图 5-77 所示。

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 5-76　精度和曲面偏移（3）

刀路轨迹	
水平加工方法	环切
水平区域切削方向	顺铣
水平区域刀具方向	由内向外
水平步距	0.2000
真环切	☑

图 5-77　刀路轨迹（3）

- 展开“高速铣”选项，选中“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 5-78 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，设置相关参数如图 5-79 所示。

参数	值
高速铣	高级参数
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.5000

图 5-78　高速铣（3）

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	251.3274
主轴转速	10000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速率（%）	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 5-79　设置机床参数（3）

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-80 所示。

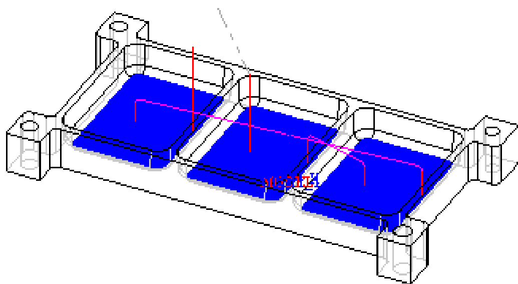


图 5-80　生成的刀具路径（3）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-81 所示。

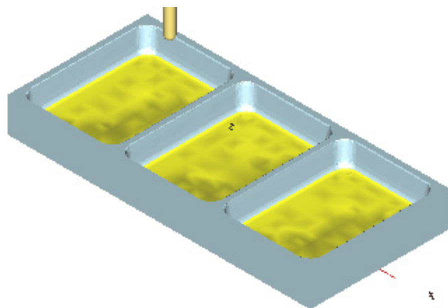


图 5-81　仿真模拟结果（3）

步骤五：侧刃铣五轴精加工中间凹腔侧壁

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（4），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 5-82 所示。

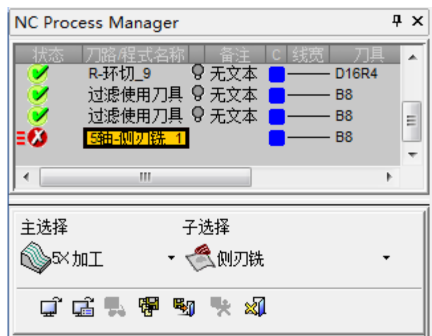


图 5-82　“NC Process Manager”对话框（4）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（5），选择 B8 球刀，如图 5-83 所示。

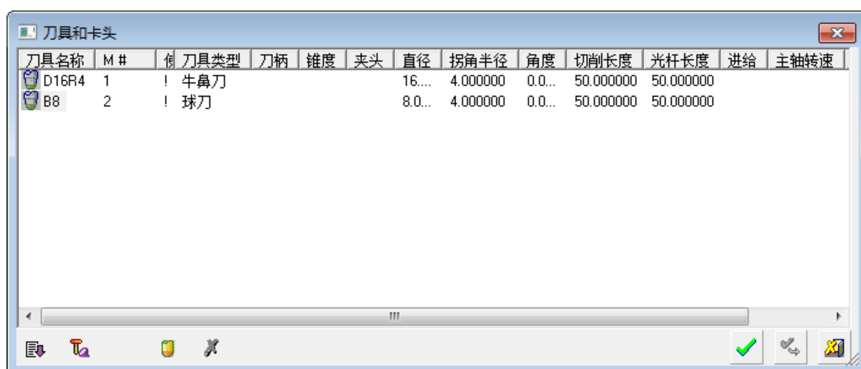


图 5-83 “刀具和卡头”对话框（5）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框（1），设置参数如图 5-84 所示。

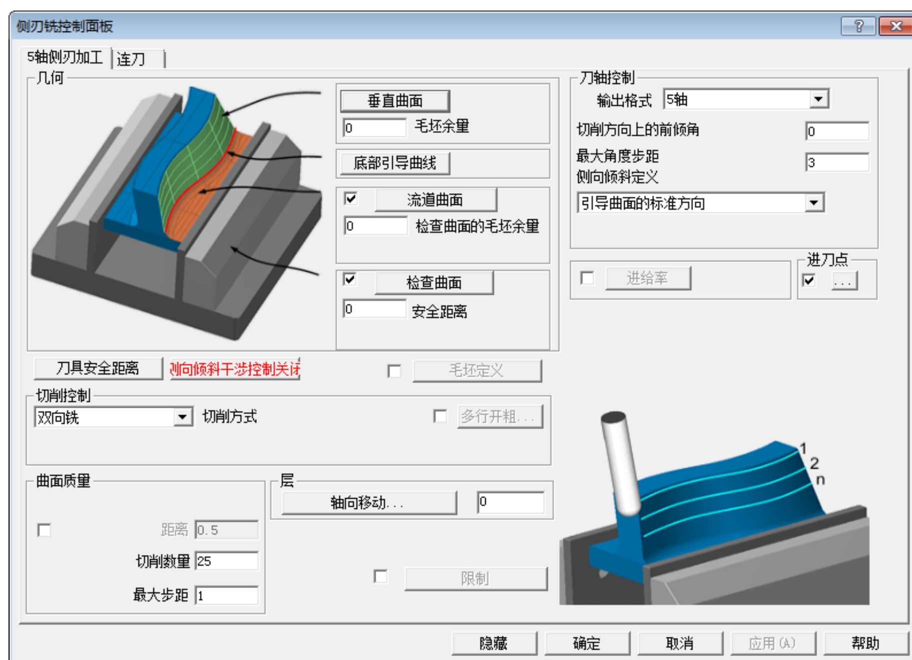


图 5-84 “侧刃铣控制面板”对话框（1）

● 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 5-85 所示的曲面为垂直曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

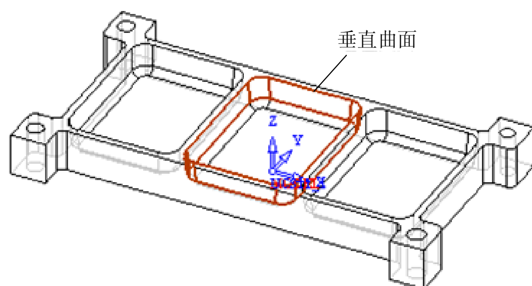


图 5-85 选择垂直曲面（1）

- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 5-86 所示的边线为底部引导曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

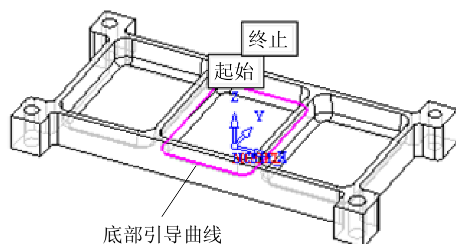


图 5-86 选择底部引导曲线（1）

- 在“几何”框中勾选“流道曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-87 所示的曲面为流道曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

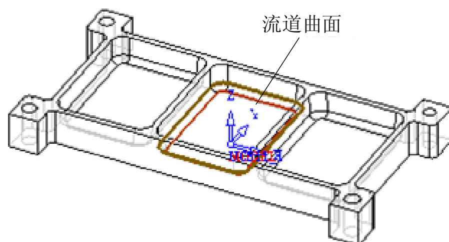


图 5-87 选择流道曲面（1）

- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-88 所示的曲面为检查曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

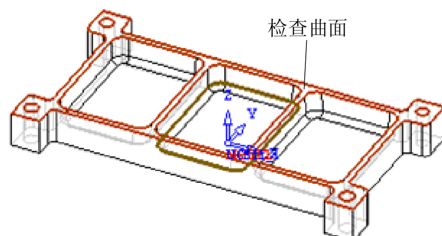


图 5-88　选择检查曲面（1）

- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框（1），如图 5-89 所示。

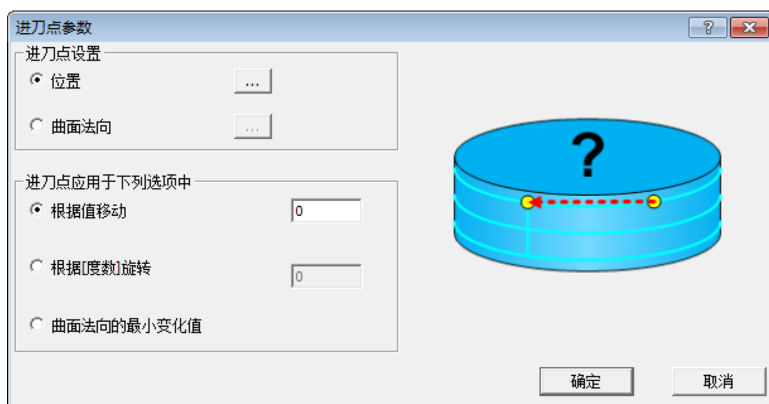


图 5-89 “进刀点参数”对话框（1）

- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，单击...按钮，选择如图 5-90 所示的位置为起点，单击鼠标中键确定；依次单击“确定”按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框。

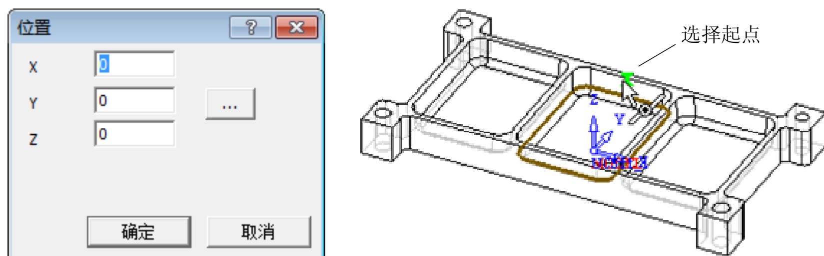


图 5-90　选择起点（1）

- 选择“连刀”选项卡（1），设置相关参数如图 5-91 所示，单击“确定”按钮，退出“侧刃铣控制面板”对话框。

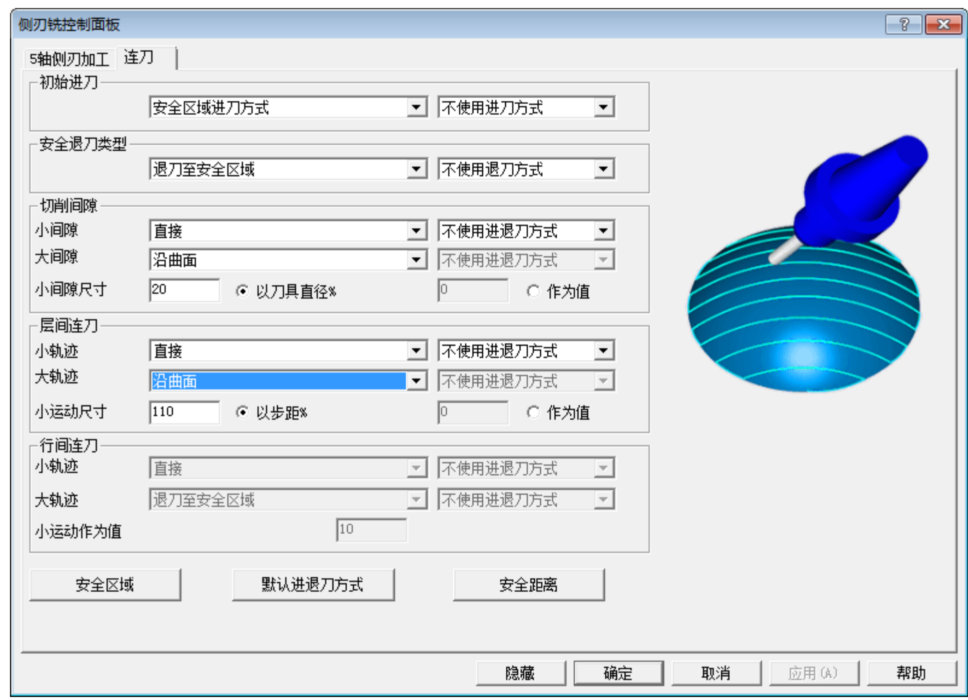


图 5-91　“连刀”选项卡（1）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-92 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-93 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	251.3274
主轴转速	10000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-92　设置机床参数（4）

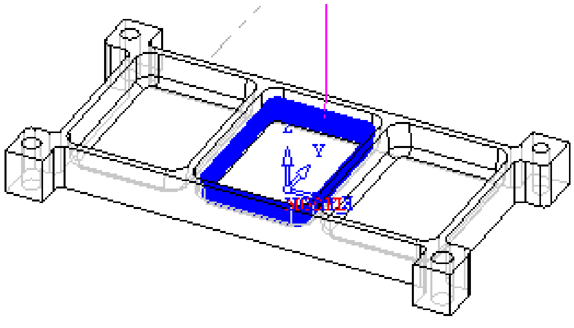


图 5-93　生成的刀具路径（4）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-94 所示。

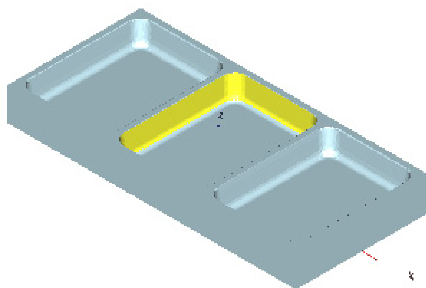


图 5-94　仿真模拟结果（4）

步骤六：侧刃铣五轴精加工左侧凹腔侧壁

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（5），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 5-95 所示。

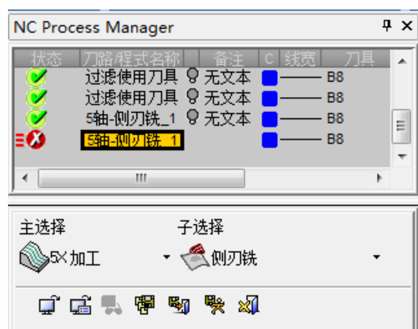


图 5-95　“NC Process Manager”对话框（5）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（6），选择 B8 球刀，如图 5-96 所示。

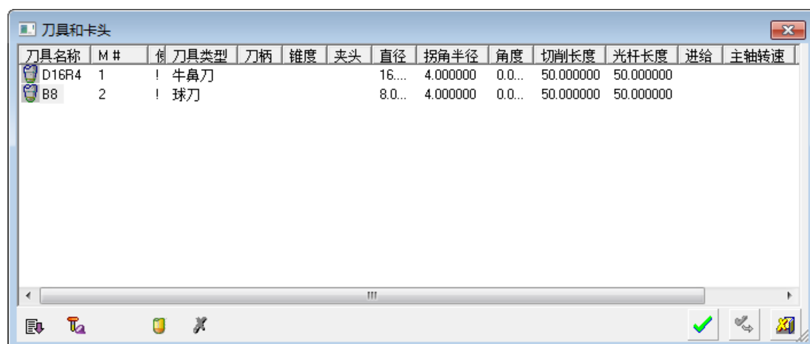


图 5-96　“刀具和卡头”对话框（6）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框（2），设置参数如图 5-97 所示。

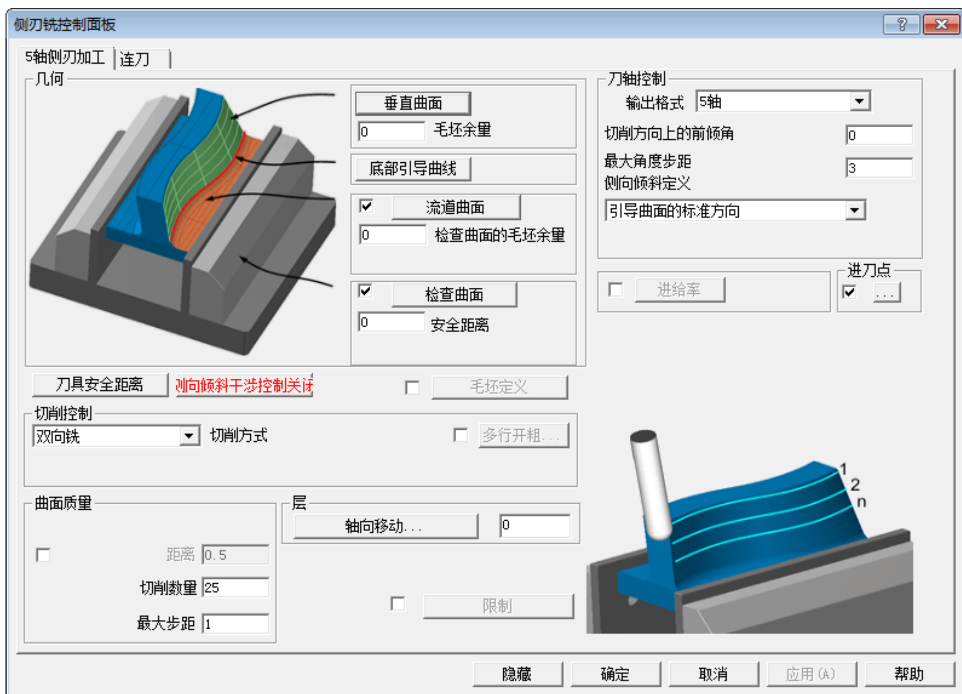


图 5-97　“侧刃铣控制面板”对话框（2）

- 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 5-98 所示的曲面为垂直曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 5-99 所示的边线为底部引导曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

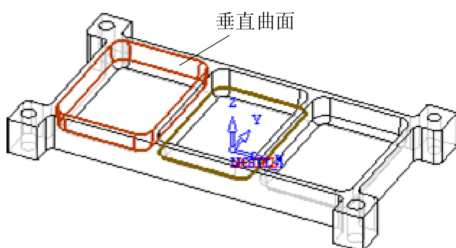


图 5-98　选择垂直曲面（2）

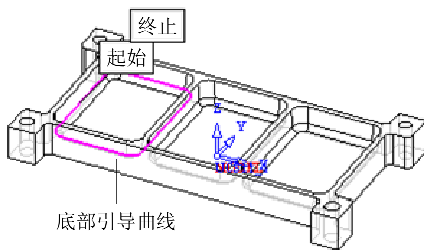


图 5-99　选择底部引导曲线（2）

- 在“几何”框中勾选“流道曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-100 所示的曲面为流道曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-101 所示的曲面为检查曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

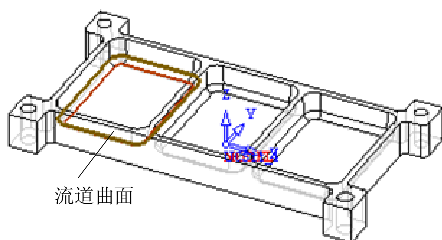


图 5-100　选择流道曲面（2）

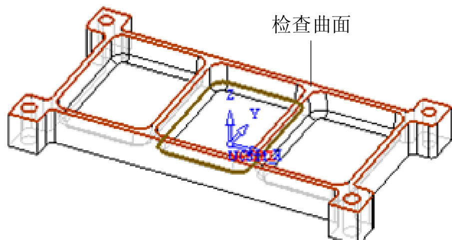


图 5-101　选择检查曲面（2）

- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框，如图 5-102 所示。
- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，单击...按钮选择如图 5-103 所示的位置为起点，单击鼠标中键确定；依次单击确定按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框（2）。

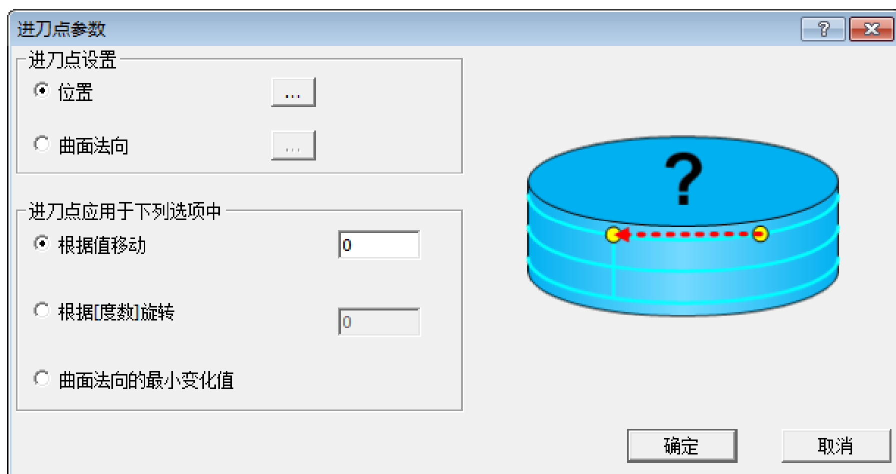


图 5-102　“进刀点参数”对话框（2）

- 选择“连刀”选项卡（2），设置相关参数如图 5-104 所示，单击“确定”按钮退出“侧刃铣控制面板”对话框。

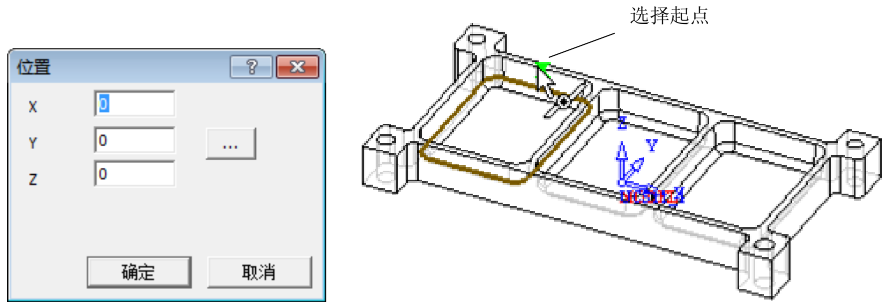


图 5-103 选择起点（2）

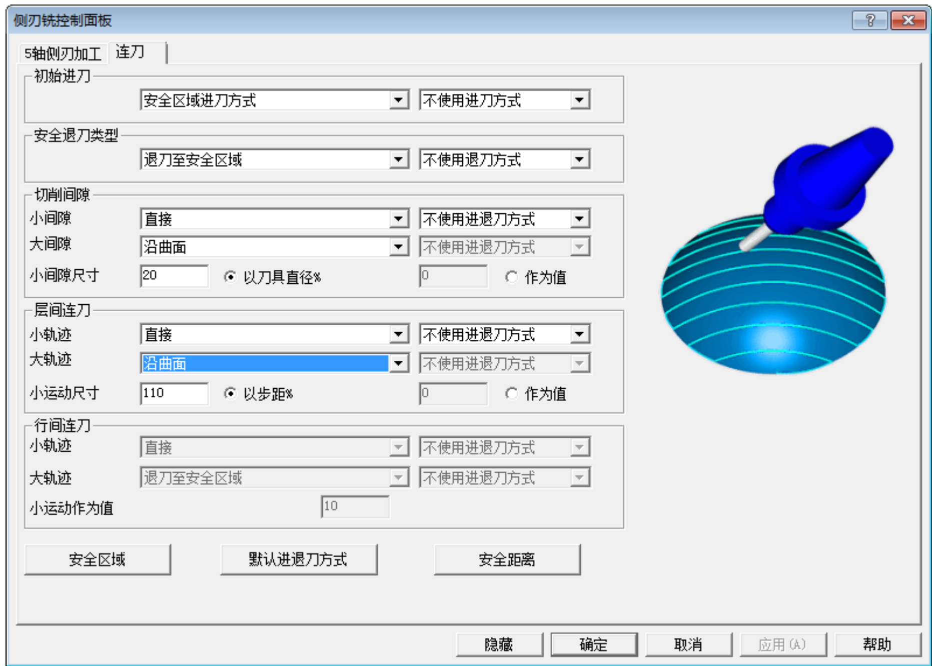


图 5-104 “连刀”选项卡（2）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-105 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	251.3274
主轴转速	10000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-105 设置机床参数（5）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-106 所示。

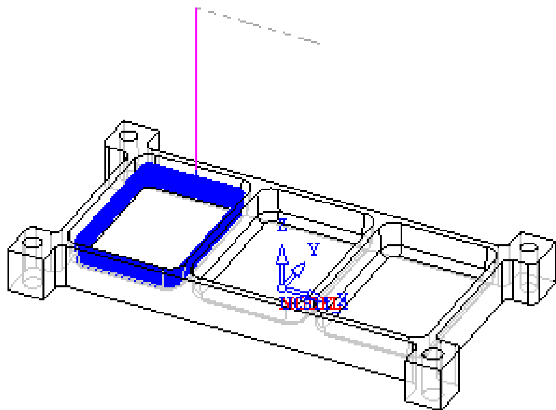


图 5-106　生成的刀具路径（5）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-107 所示。

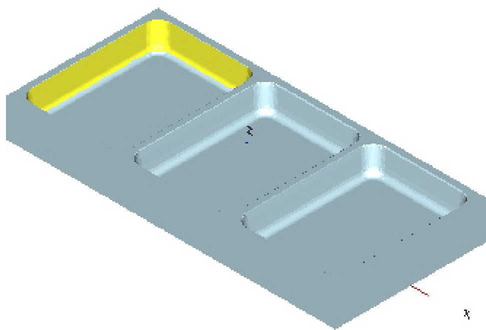


图 5-107　仿真模拟结果（5）

步骤七：侧刃铣五轴精加工右侧凹腔侧壁

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（6），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 5-108 所示。

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（7），选择 B8 球刀，如图 5-109 所示。

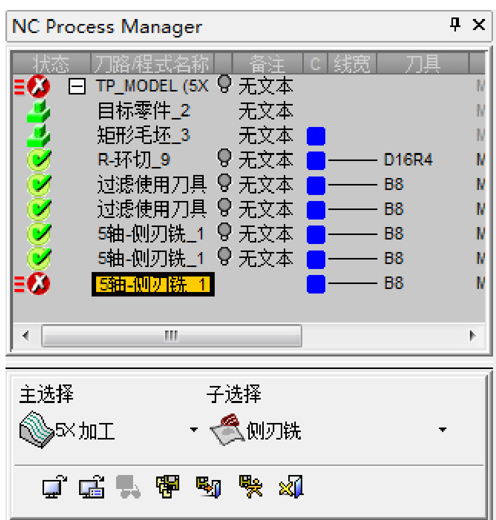


图 5-108 “NC Process Manager”对话框（6）

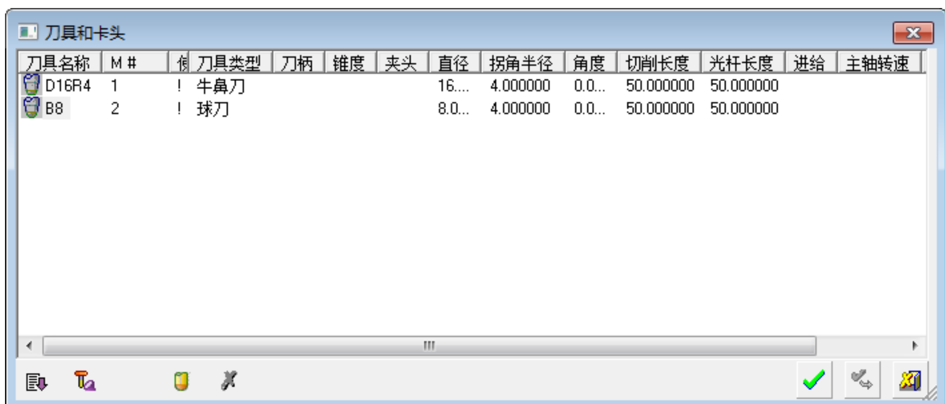


图 5-109 “刀具和卡头”对话框（7）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框，设置参数如图 5-110 所示。

- 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 5-111 所示的曲面为垂直曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 5-112 所示的边线为底部引导曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框（3）。

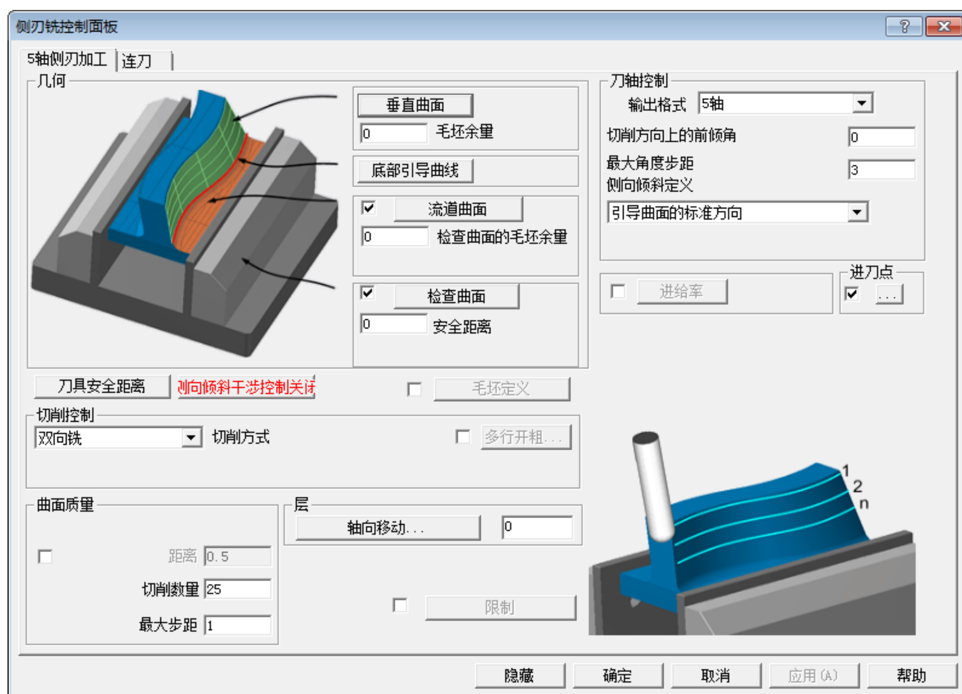


图 5-110　“侧刃铣控制面板”对话框（3）

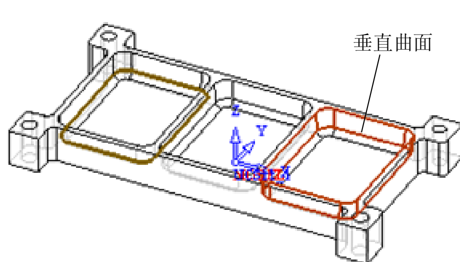


图 5-111　选择垂直曲面（3）

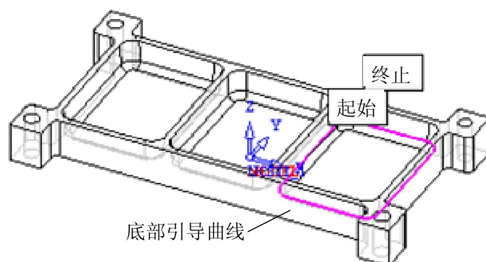


图 5-112　选择底部引导曲线（3）

- 在“几何”框中勾选“流道曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-113 所示的曲面为流道曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-114 所示的曲面为检查曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

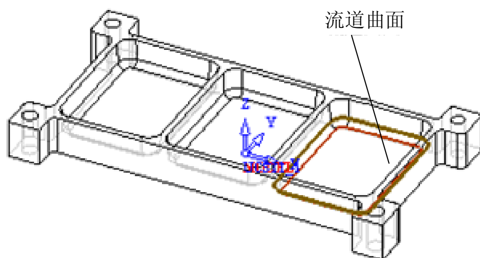


图 5-113 选择流道曲面（3）

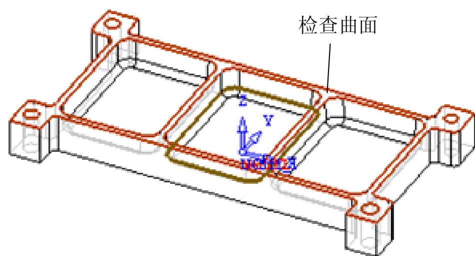


图 5-114 选择检查曲面（3）

- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框（3），如图 5-115 所示。

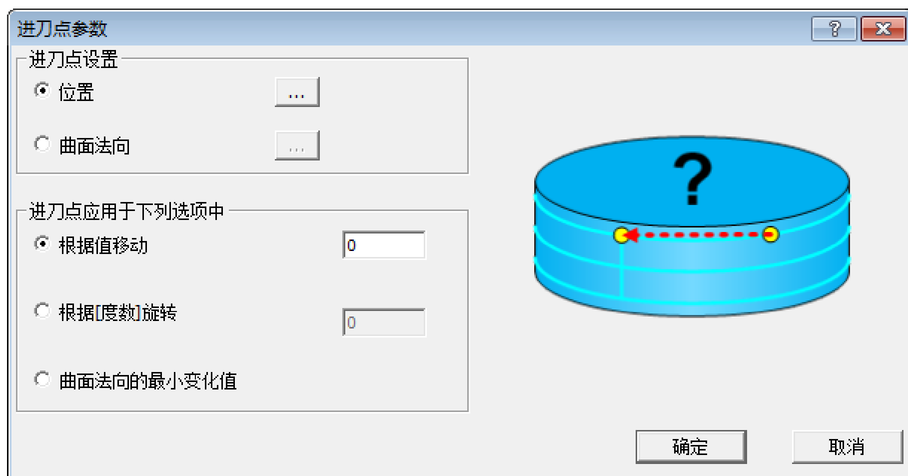
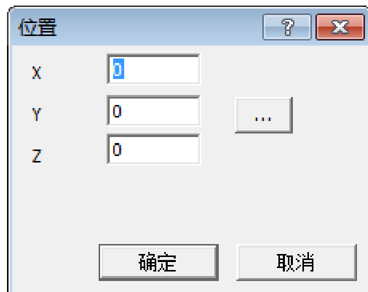


图 5-115 “进刀点参数”对话框（3）

- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，单击...按钮选择如图 5-116 所示的位置为起点，单击鼠标中键确定，依次单击“确定”按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框。



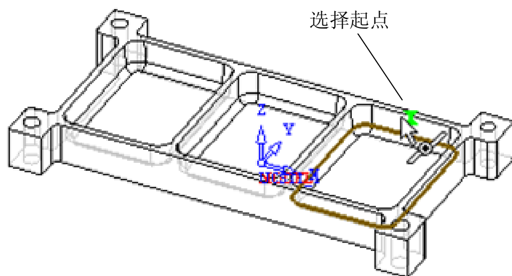


图 5-116 选择起点（3）

- 选择“连刀”选项卡（3），设置相关参数如图 5-117 所示，单击“确定”按钮退出“侧刃铣控制面板”对话框。

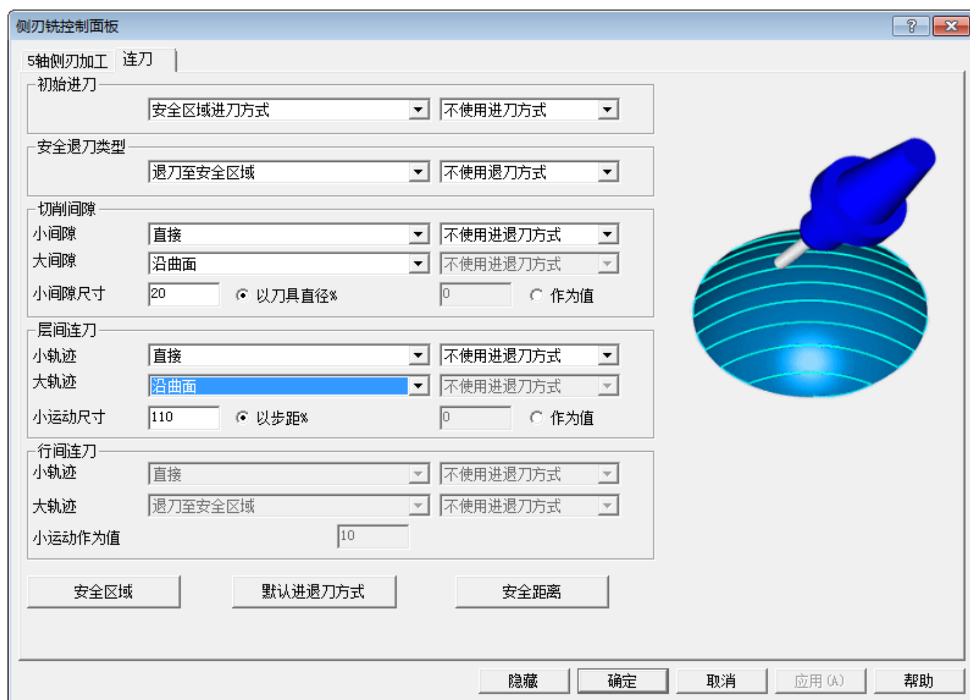


图 5-117　“连刀”选项卡（3）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-118 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	251.3274
主轴转速	10000
进给(毫米/分钟)	5000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-118　设置机床参数（6）

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-119 所示。

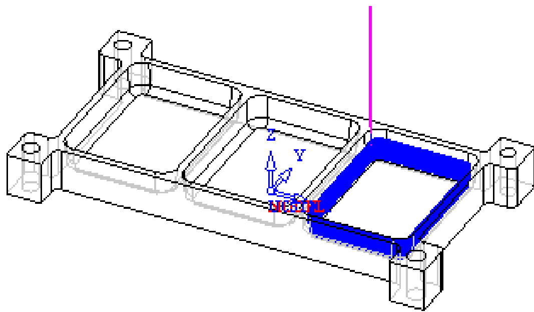


图 5-119 生成的刀具路径（6）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-120 所示。

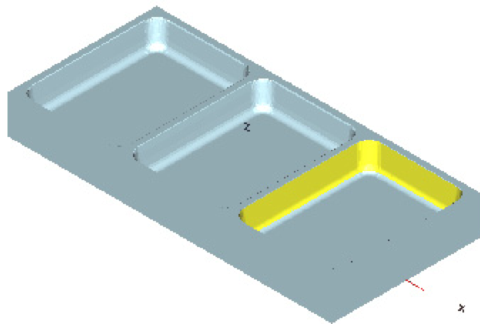


图 5-120 仿真模拟结果（6）

5.2.5 实例总结

本节讲解了 Cimatron E9.0 五轴侧刃铣加工方法和具体过程，读者在学习过程中要注意的是：五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削对倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件加工，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率，适用于有固定拔模角的航空类框体零件加工。

5.3 经典实例——倒扣方盒零件五轴高速加工

5.3.1 实例描述

倒扣方盒零件如图 5-121 所示。整个零件有一个凹腔，凹腔向内有 5° 的

拔模斜度。材料为淬硬工具钢，表面粗糙度为 Ra0.8μm，采用五轴加工机床进行加工。

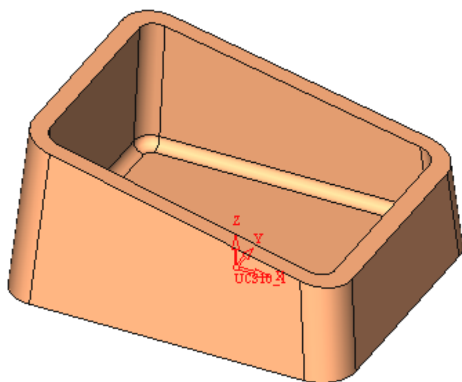


图 5-121　倒扣方盒零件

5.3.2　加工方法分析

根据高速加工的工艺要求，倒扣方盒零件采用工艺路线为“粗加工”→“精加工”。倒扣方盒零件高速数控加工切削参数，见表 5-5。

1）粗加工

首先采用较大直径的刀具进行粗加工以便于去除大量多余加工留量。粗加工采用体积铣粗环切方法，刀具直径为ϕ8mm、R 为 1mm 的牛鼻刀。

2）精加工

- 外侧壁加工：采用五轴侧刃铣利用侧刃加工，提高该类零件的加工质量和加工效率，刀具为直径ϕ6mm 的球刀。
- 顶面加工：采用航空铣五轴加工，加工方式采用两曲线之间仿形铣；刀轴采用“没有倾斜，保持和曲面垂直”，刀具为直径ϕ6mm 的球刀。
- 内侧壁加工：采用五轴侧刃铣利用侧刃加工，提高该类零件的加工质量和加工效率，刀具为直径ϕ6mm 的球刀。
- 凹腔底面：采用航空铣五轴加工，加工方式采用平行于曲面铣；刀轴采用“根据角度倾斜”，与 Z 轴倾斜−20°；刀具为直径ϕ6mm 的球刀。

表 5-5　倒扣方盒零件高速数控加工切削参数

刀具直径/mm	刀齿数	轴向深度/mm	径向切深/mm	主轴转速 n/（r/min）	进给率/（mm/min）	加工方式
8	2	—	—	12000	6000	粗加工
6	2	0.3	0.3	15000	6000	精加工

5.3.3 加工流程与所用知识点

倒扣方盒零件数控加工具体的设计流程和知识点，如表 5-6 所示。

表 5-6 倒扣方盒零件数控加工具体的设计流程和知识点

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 1：导入模型	加工模型的导入是数控编程的第一步就是，它是生成数控代码的前提与基础	
Step 2：创建刀具	刀具是进行数控加工的工具，根据加工需要应选择适用的刀具	
Step 3：创建刀路轨迹	创建刀路轨迹用于创建一个刀具路径程序组，一个刀路轨迹可以包含一个或多个加工程序	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step 4： 创建零件	零件是毛坯最终加工完成的结果，通常系统默认已创建好的模型作为零件	
Step 5： 创建毛坯	在数控加工中必须定义加工毛坯，产生的刀具路径始终在毛坯内部生成	
Step6： 体积铣粗环切	粗环切是最常用而且加工策略最丰富的开粗方法，刀具在 Z 方向先以固定层降或变化层降方式下切到某一深度，然后在该深度层中以环绕的走刀方式进行切削	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step7：五轴侧刃铣加工外侧壁	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削对倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件加工，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	
Step8：航空铣加工顶面	航空铣两曲线之间仿形铣通过指定两条曲线控制刀具路径的起始与终止边界，生成的刀具路径在两条曲线之间过渡	

（续）

步　　骤	设计知识点	设计流程效果图
Step9： 五轴侧刃铣加工中间凹腔侧壁	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削对倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件加工，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	
Step10： 航空铣加工凹腔底面	五轴侧刃铣是利用刀具侧面切削对倾斜侧壁或倒扣位置薄壁类零件加工，使用五轴侧刃加工可大大提高该类零件的加工质量和加工效率	

5.3.4 具体操作步骤

步骤一：加工准备

1. 进入编程模块，导入 CAD 模型文件

1）启动 Cimatron E9.0。启动 Cimatron E9.0，选择下拉菜单“文件”→“新建文件”命令，弹出“新建文档”对话框，选择类型为“编程”，单位为“毫米”，如图 5-122 所示。单击“确定”按钮进入编程界面。



图 5-122 “新建文档”对话框

2）调入模型。单击窗口右侧“加工向导”工具栏上的“调入模型”按钮，选择“daokoufanghe.elt”（“随书光盘：\Chapter05\5.3\uncompleted\daokoufanghe.elt”）文件，单击“选择”按钮，此时模型会显示在图形区。单击“Feature Guide”对话框中的确定按钮✓，完成模型调入，如图 5-123 所示。

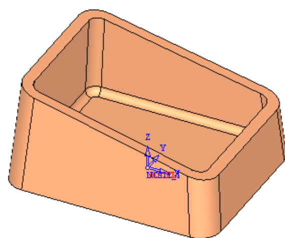


图 5-123 调入模型

2. 创建刀具

1）创建 D8mmR2mm 牛鼻刀，具体步骤如下：

- 单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（1），如图 5-124 所示。
- 单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-125 所示。依次单击确定按钮✓，完成刀具创建。

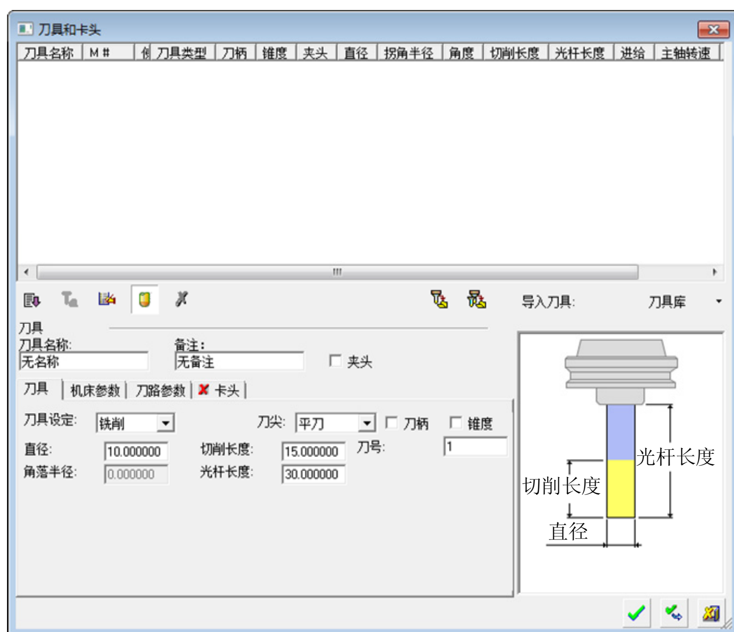


图 5-124　“刀具和卡头”对话框（1）

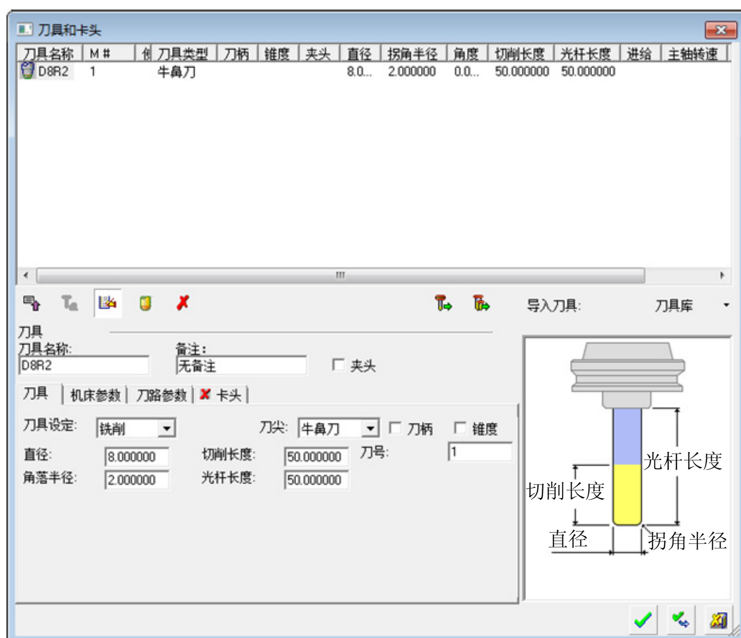


图 5-125　“刀具库”对话框

2）创建 B6 球刀。单击“加工向导”工具栏上的“刀具”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框，单击新刀具按钮，设置刀具参数如图 5-126 所示。依次单

击确定按钮✓，完成刀具创建。

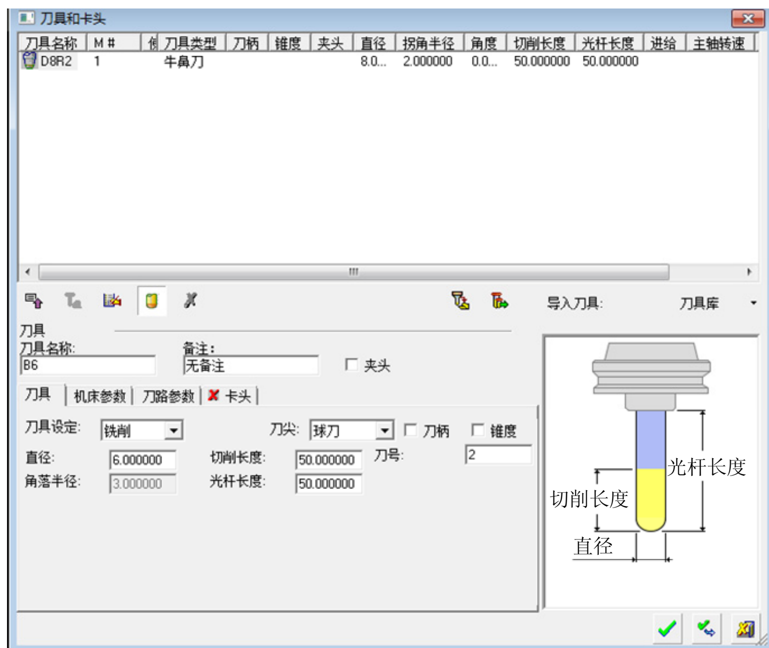


图 5-126 创建 B6 球刀

3. 创建刀路轨迹

单击“加工向导”工具栏上的“刀路轨迹”按钮，弹出“创建刀路轨迹”对话框，设置“刀具路径”“类型”为“5 轴”，UCS 选择“MODEL”，安全平面“Z”为“80”，如图 5-127 所示。单击确定按钮✓，完成刀路轨迹的创建。



图 5-127 “创建刀路轨迹”对话框

4. 创建零件

单击“加工向导”工具栏上的“零件”按钮，弹出“零件”对话框，设置“零件类型”为“目标”，自动选择所有模型作为零件；单击确定按钮创建零件，如图 5-128 所示。



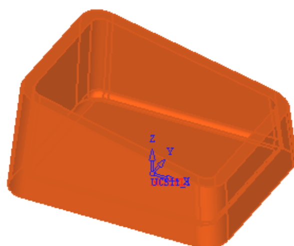
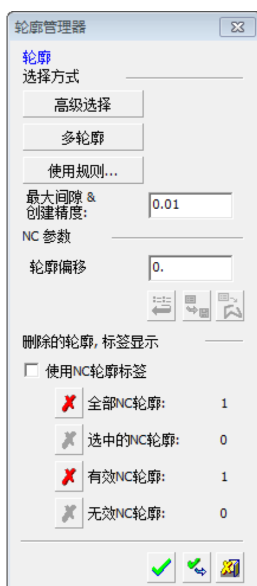


图 5-128　创建零件

5. 创建毛坯

1）单击“加工向导”工具栏上的“毛坯”按钮，弹出“初始毛坯”对话框，设置“毛坯类型”为“轮廓”；单击“选择轮廓”按钮，系统弹出“轮廓管理器”对话框，选择如图 5-129 所示的模型边线，单击鼠标中键返回；单击确定按钮返回“初始毛坯”对话框。



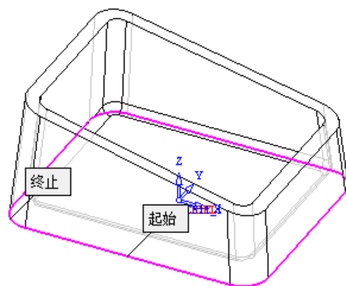


图 5-129　选择轮廓

2）在“Z-顶部”文本框中输入“55.000000”，“轮廓偏移”为 3，单击确定按钮✓，完成毛坯的创建，如图 5-130 所示。

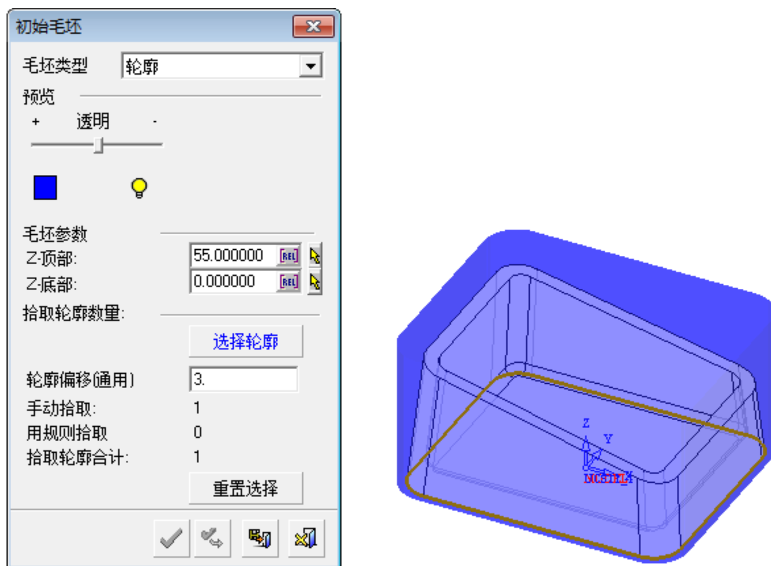


图 5-130　创建毛坯

步骤二：体积铣粗环切粗加工

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（1），“主选择”为“体积铣”，“子选择”为“粗环切”，如图 5-131 所示。

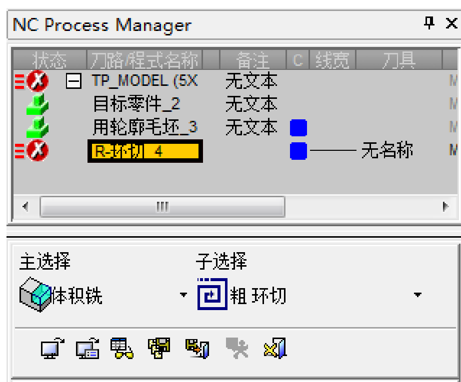


图 5-131　“NC Process Manager”对话框（1）

2）选择加工曲面，具体操作步骤如下：

- 展开“零件”选项，单击“零件曲面”按钮，然后单击“选择”工具栏

上的选择所有按钮，系统选中所有曲面；此时图形中所有曲面高亮显示，如图 5-132 所示。

- 单击鼠标中键完成曲面选择，返回程序对话框；在“零件曲面”上将显示所选曲面数量为 27，如图 5-133 所示。

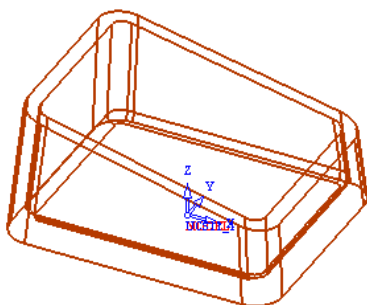


图 5-132　选择所有曲面

⊟ 零件	
边界（可选）	0
零件曲面组数量	1
零件曲面	27

图 5-133　“零件”选项

3）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（2），选择 D8R2 牛鼻刀，如图 5-134 所示。

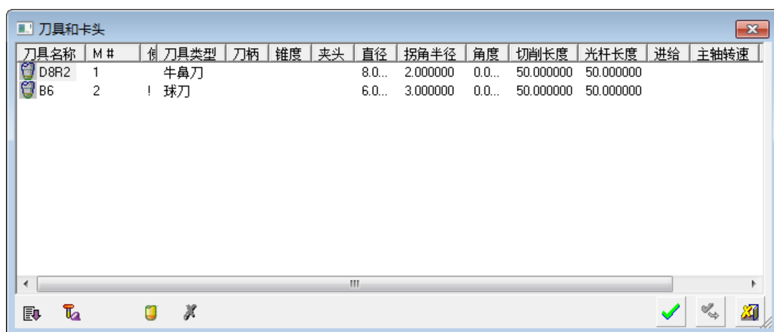


图 5-134　“刀具和卡头”对话框（2）

4）设置加工参数，具体步骤如下：

- 展开“刀路参数”选项中的“安全平面”，选中“使用安全高度”复选框，“内部安全高度”为“优化”，设置“垂直安全距离”为“5.0000”，如图 5-135 所示。

参数	值
⊟ 刀路参数	
⊟ 安全平面	
使用安全高度	☑
安全平面	80.000000
内部安全高度	优化
垂直安全距离	5.0000
坐标系名称	MODEL

图 5-135　安全平面

- 展开“刀路参数”选项中的“进刀和退刀点”，设置“进刀角度”为“12.0000”，如图 5-136 所示。
- 展开“精度和曲面偏移”选项，设置“零件加工余量”为“0.3000”，“曲面精度”为“0.0100”；其他参数如图 5-137 所示。

进刀和退刀点	优化
进入方式	优化
进刀角度	12.0000
最小切削宽度	0.0200
最大螺旋半径	3.8400
螺纹铣	32.0000
外部进刀毛坯限制	☑

图 5-136　进刀和退刀点

参数	值
精度和曲面偏移	基本参数
零件加工余量	0.3000
曲面精度	0.0100
微铣削最大轮廓间	0.0100

图 5-137　精度和曲面偏移

- 展开“刀路轨迹”选项，设置“切削方向”为“混合铣”、“策略”为“用户定义”，取消“策略：毛坯环切”复选框，设置“固定垂直步进”为“0.2500”、“侧向步长”为“0.8000”，选中“真环切”复选框，设置“加工由”为“区域”；其他参数如图 5-138 所示。

参数	值
刀路轨迹	
切削方向	混合铣
策略	用户定义
策略：毛坯环切	☐
策略：由外到内	☑
策略：由内到外	☑
连接区域	当前层
垂直步进类型	固定 + 水
固定垂直步进	0.2500
侧向步长	0.8000
真环切	☑
从安全平面到固定	☐
加工由	区域
半精轨迹	所有周
为半精轨迹留余量	0.0800

图 5-138　刀路轨迹

- 展开“高速铣”选项，选中“摆线”、“快速圆角连接”和“角部圆角连接”复选框；其他参数如图 5-139 所示。
- 展开“清理行间间隙”选项，设置“行间间隙策略”为“CBP&Ridges”选项；其他参数如图 5-140 所示。

5）设置机床参数。展开“机床参数”选项，选中“自适配进给控制”复选框，其他相关参数设置如图 5-141 所示。

6）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-142 所示。

高速铣	高级参数
摆线	☑
摆线步距	0.8000
预设置的摆线半径	2.4000
多层 Z	☑
快速圆角连接	☑
角部圆角连接	☑
首选圆角	0.6000

图 5-139　高速铣

清理行间间隙	高级参
行间间隙策略	CBP &Ridge
圆角延伸	0.4000
有效范围半径	0.5600
最狭窄区域宽度	0.1600

图 5-140　清理行间间隙

机床参数	
Vc(米/分钟)	301.5929
主轴转速	12000
进给(毫米/分钟)	6000.000
进刀速率（%）	30
切入进给速率(%)	30
自适配进给控制	☑
增加到 (%)	150
减少到 (%)	30
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关

图 5-141　设置机床参数（1）

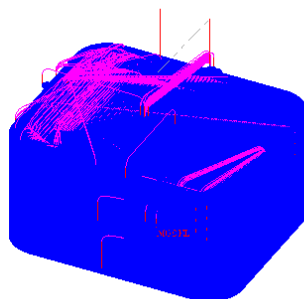


图 5-142　生成的刀具路径（1）

7）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-143 所示。

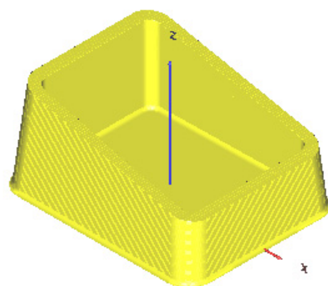


图 5-143　仿真模拟结果（1）

步骤三：侧刃铣五轴精加工外侧壁

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出

“NC Process Manager”对话框（2），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 5-144 所示。

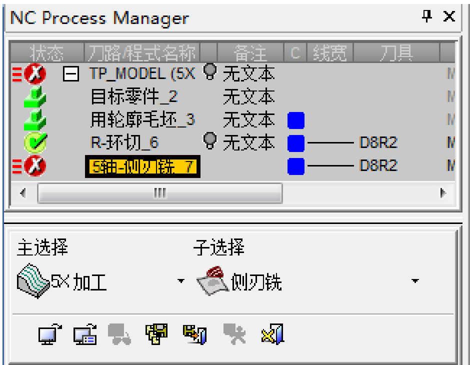


图 5-144 “NC Process Manager”对话框（2）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（3），选择 B6 球刀，如图 5-145 所示。

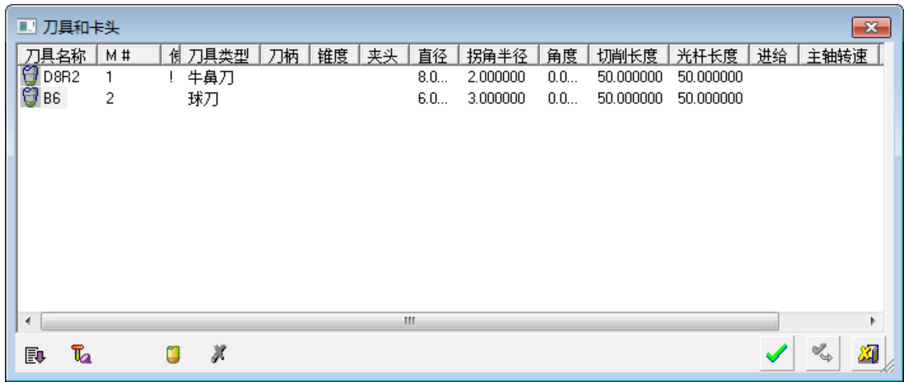


图 5-145 “刀具和卡头”对话框（3）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框，设置参数如图 5-146 所示。

- 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 5-147 所示的曲面为垂直曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 5-148 所示的边线为底部引导曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-149 所示的曲面为检查曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框（1）。

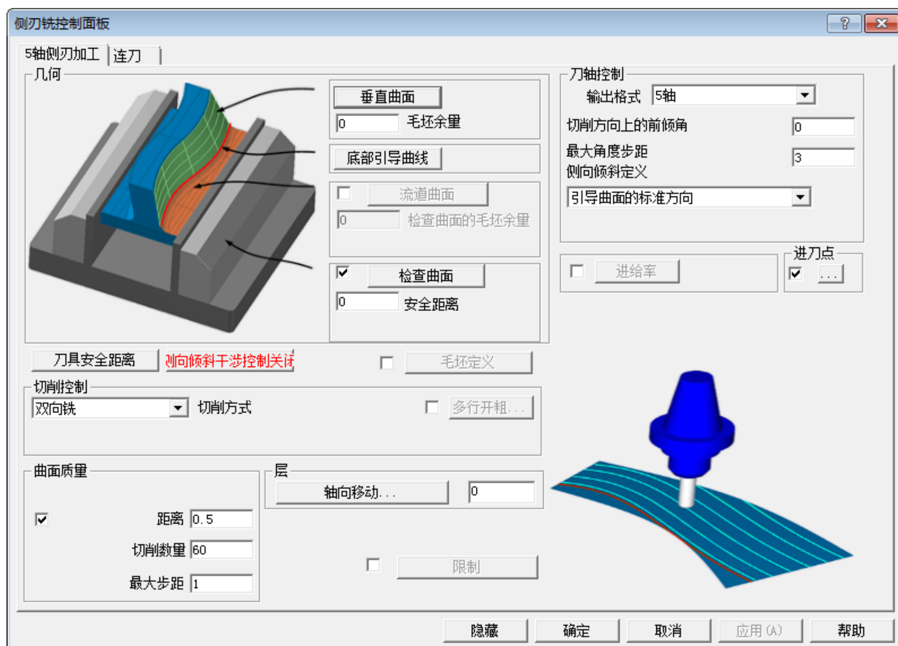


图 5-146　“侧刃铣控制面板”对话框（1）

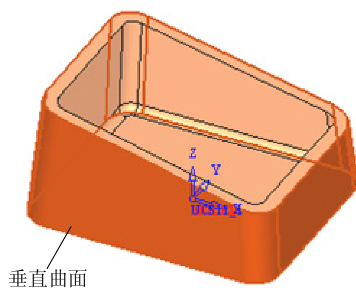


图 5-147　选择垂直曲面（1）

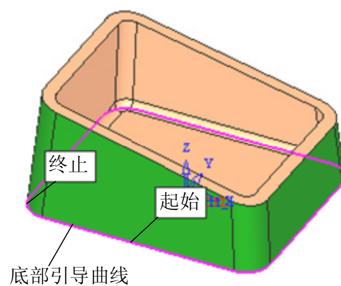


图 5-148　选择底部引导曲线（1）

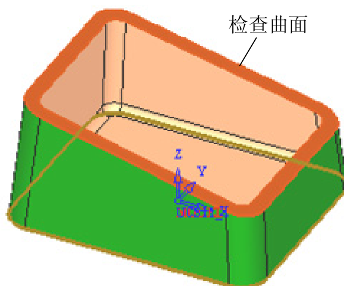


图 5-149　选择检查曲面（1）

- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框（1），如图 5-150 所示。

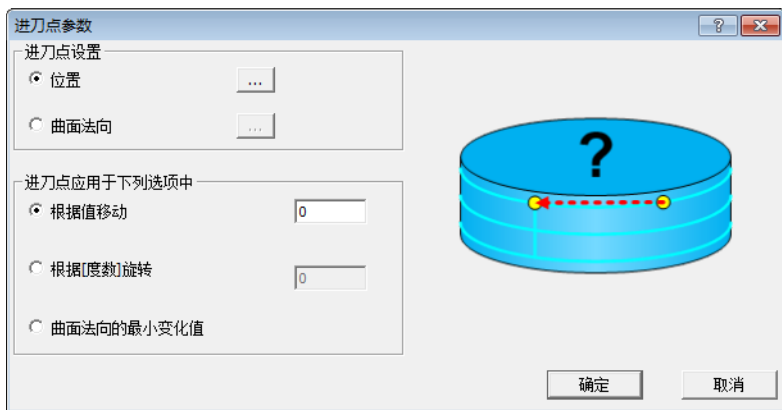


图 5-150 “进刀点参数”对话框（1）

- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，单击...按钮选择如图 5-151 所示的位置为起点，单击鼠标中键确定。依次单击“确定”按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框。

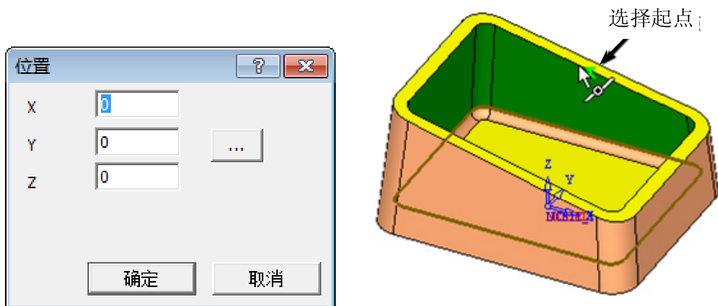


图 5-151 选择起点（1）

- 选择“连刀”选项卡，设置相关参数如图 5-152 所示，单击“确定”按钮退出“侧刃铣控制面板”对话框。

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-153 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-154 所示。

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron's Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-155 所示。

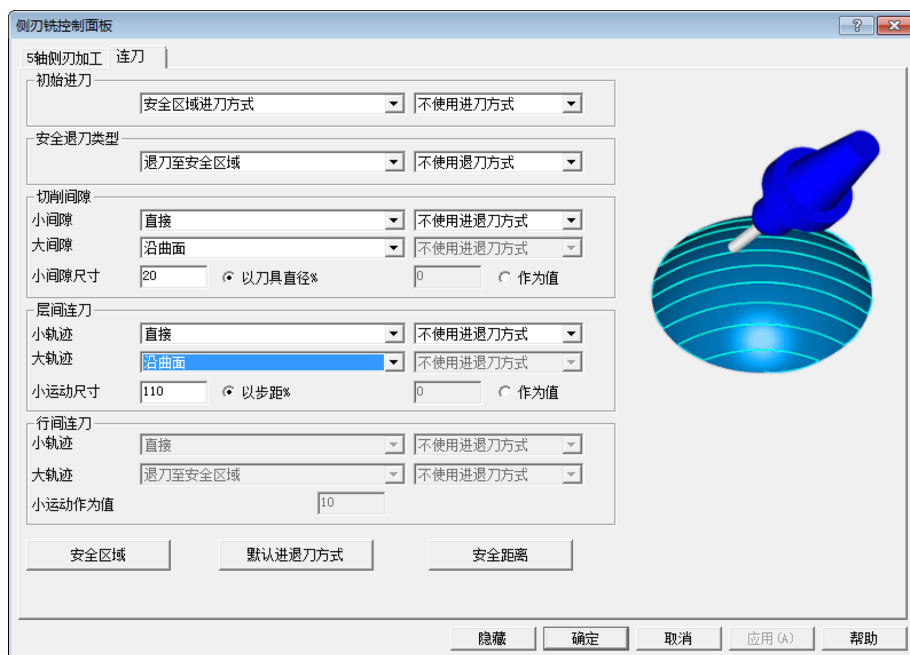


图 5-152　“连刀”选项卡（1）

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	282.7433
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-153　设置机床参数（2）

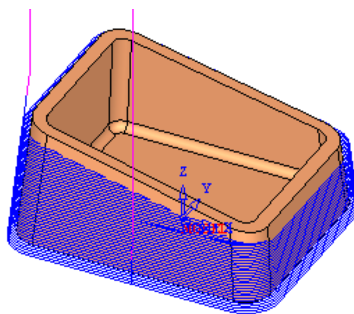


图 5-154　生成的刀具路径（2）

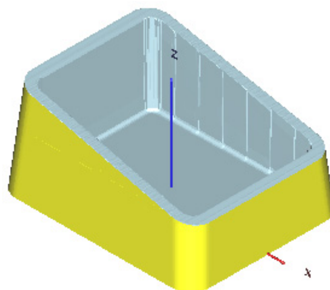


图 5-155　仿真模拟结果（2）

步骤四：航空铣五轴精加工顶面

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（3），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 5-156 所示。

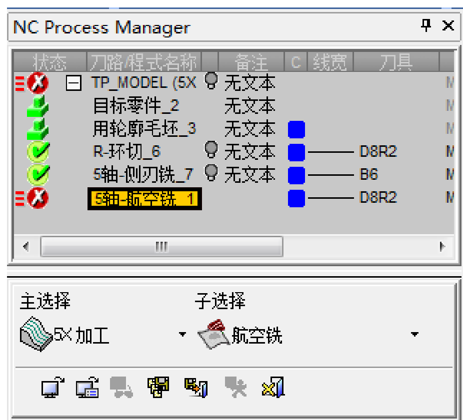


图 5-156 “NC Process Manager”对话框（3）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（4），选择 B6 球刀，如图 5-157 所示。

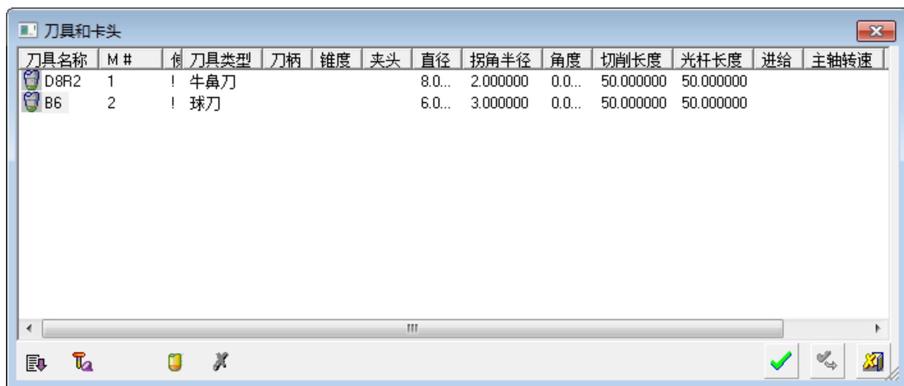


图 5-157 “刀具和卡头”对话框（4）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框（1），设置参数如图 5-158 所示。

- 单击“第一”按钮，选择如图 5-159 所示的边线为第一曲线，然后单击鼠标中键确定；单击“第二”按钮，选择如图 5-160 所示的边线为第二曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

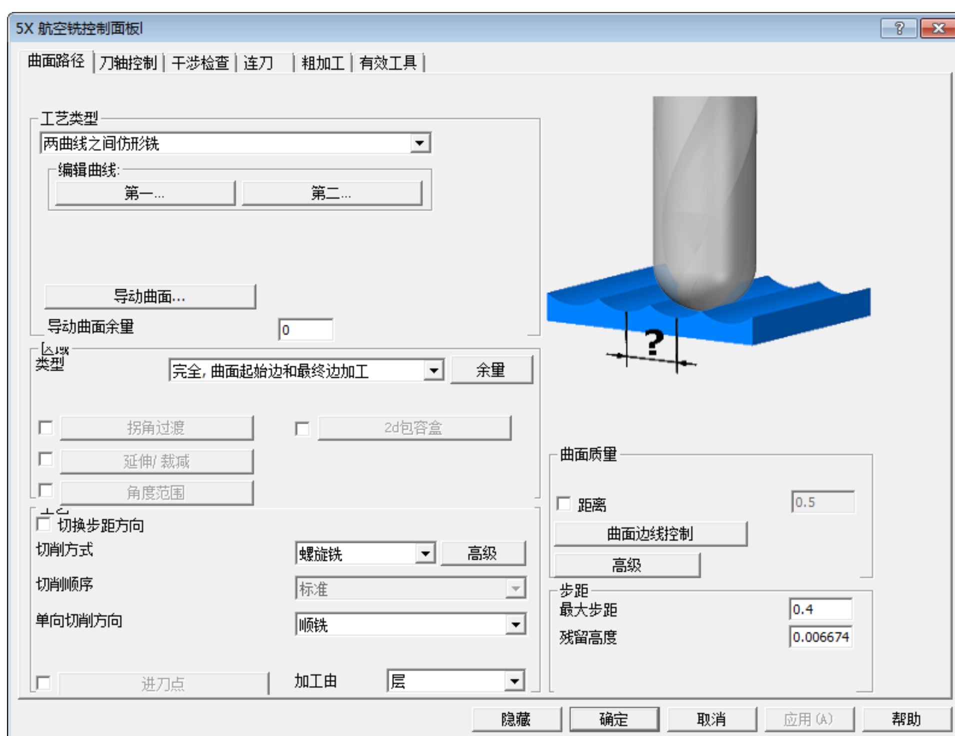


图 5-158　“5X 航空铣控制面板”对话框（1）

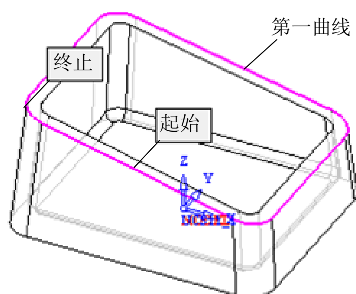


图 5-159　选择第一曲线

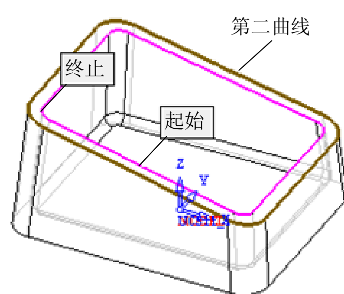


图 5-160　选择第二曲线

- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 5-161 所示的曲面为加工曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

4）设置刀轴。选择“刀轴控制”选项卡，选择“刀轴将”为“没有倾斜，保持和曲面垂直”方式，如图 5-162 所示。

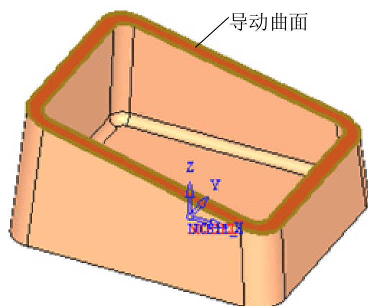


图 5-161　选择导动曲面（1）

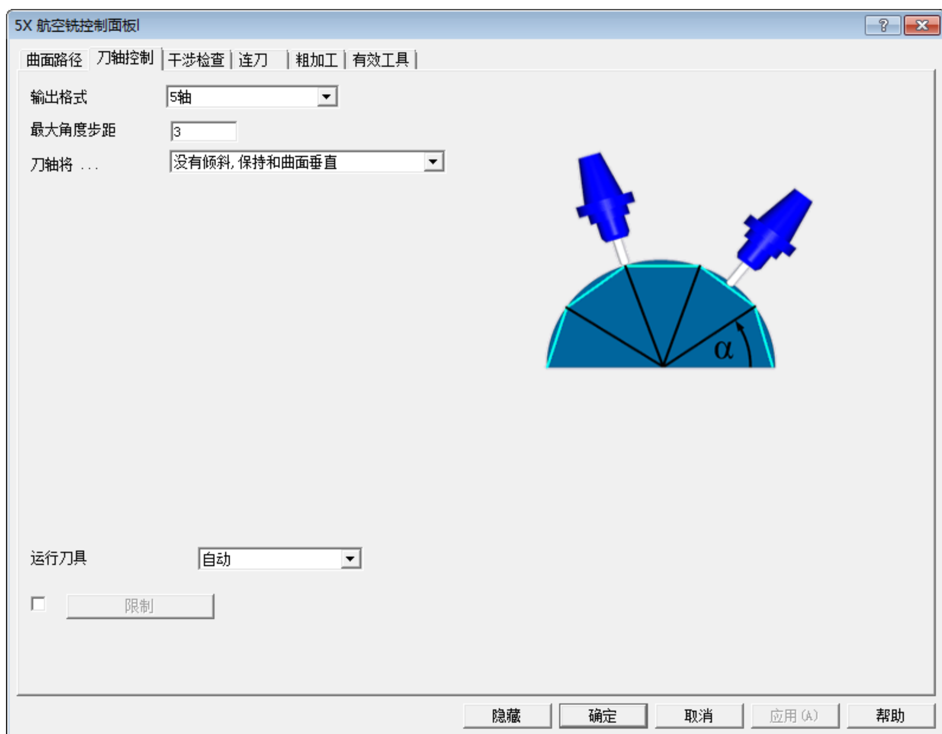


图 5-162　“刀轴控制”选项卡

5）设置“连刀”选项卡，具体步骤如下：

- 选择“连刀”选项卡，设置相关参数如图 5-163 所示，单击“确定”按钮退出“5X 航空铣控制面板”对话框。
- 单击“默认进退刀方式”按钮，弹出“默认进退刀方式”对话框，选择进退刀类型为“相切圆弧”；其他参数如图 5-164 所示。

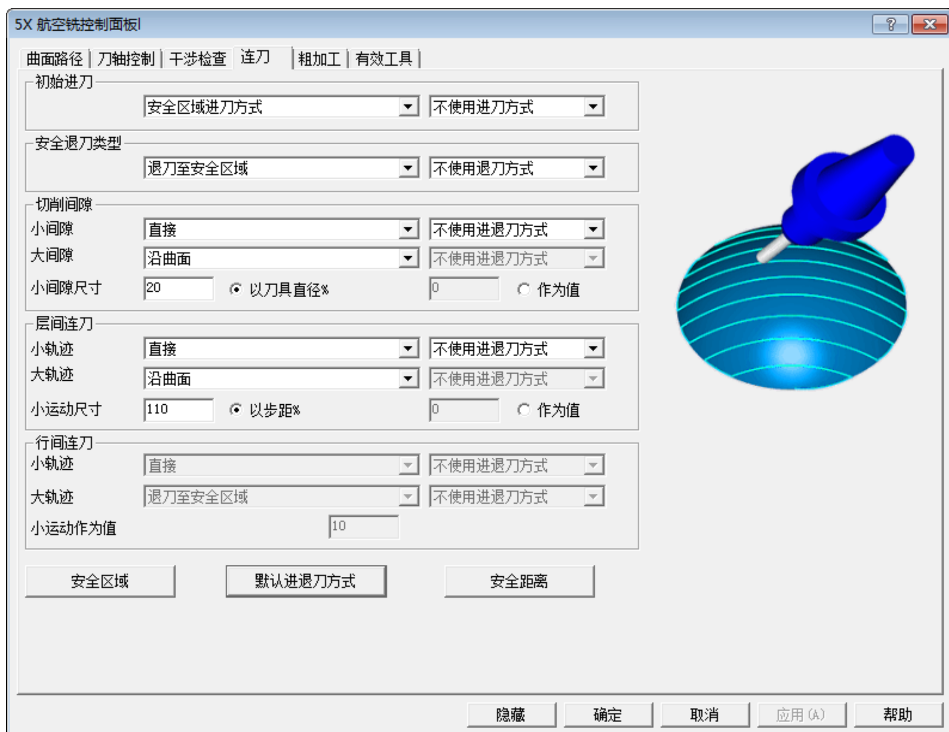


图 5-163　“连刀”选项卡（2）

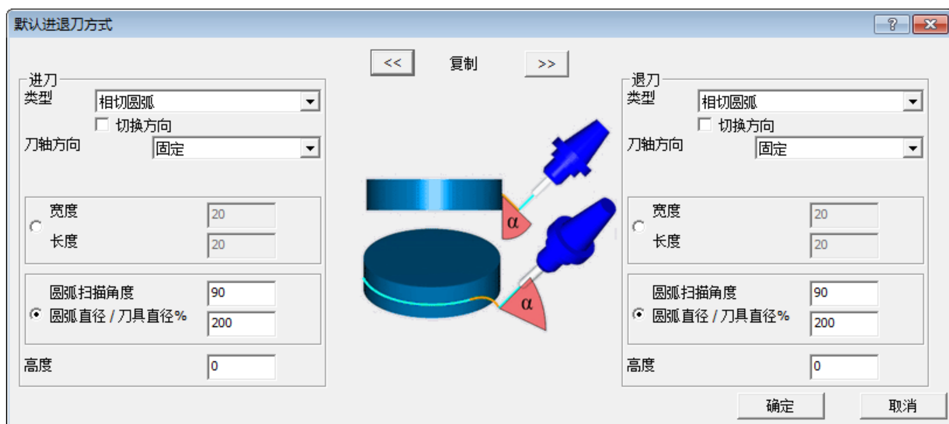


图 5-164　“默认进退刀方式”对话框

6）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-165 所示。

7）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-166 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	282.7433
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-165　设置机床参数（3）

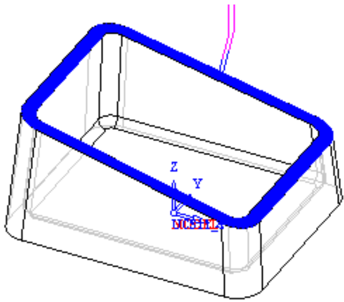


图 5-166　生成的刀具路径（3）

8）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮✓；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-167 所示。

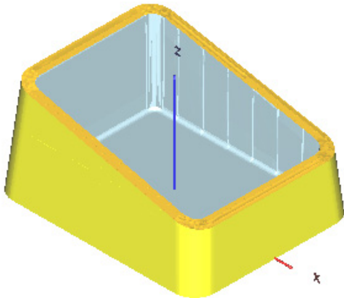


图 5-167　仿真模拟结果（3）

步骤五：侧刃铣五轴精加工内侧壁

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（4），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“侧刃铣”，如图 5-168 所示。

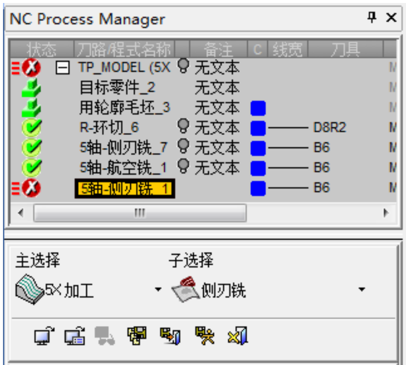


图 5-168　“NC Process Manager”对话框（4）

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（5），选择 B6 球刀，如图 5-169 所示。

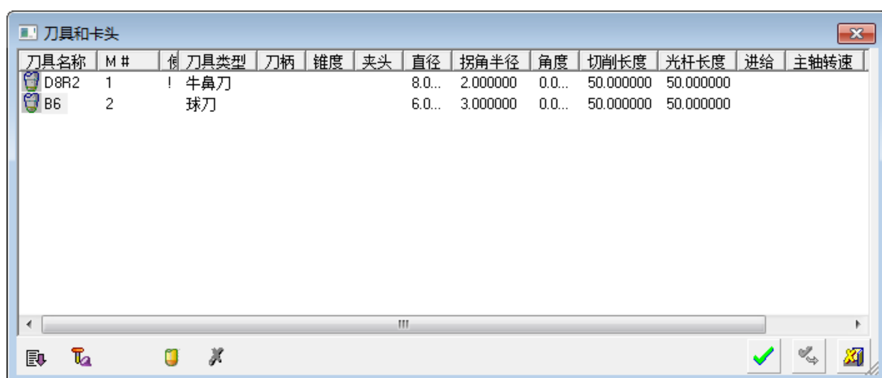


图 5-169 “刀具和卡头”对话框（5）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“侧刃铣控制面板”对话框（2），设置参数如图 5-170 所示。

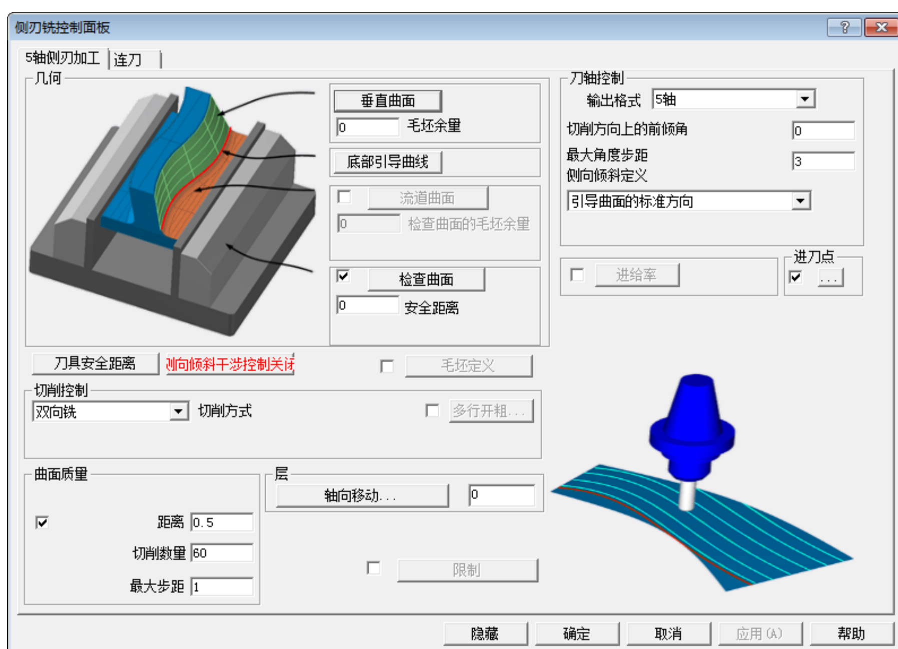


图 5-170 “侧刃铣控制面板”对话框（2）

- 在“几何”框中单击“垂直曲面”按钮，选择如图 5-171 所示的曲面为垂直曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

- 在“几何”框中单击“底部引导曲线”按钮，选择如图 5-172 所示的边线为底部引导曲线，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

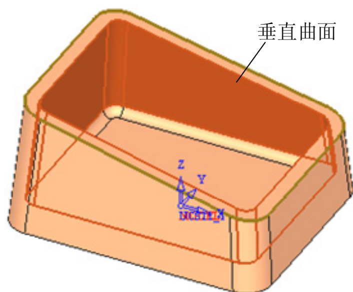


图 5-171 选择垂直曲面（2）

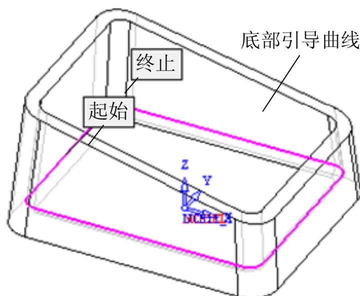


图 5-172 选择底部引导曲线（2）

- 在“几何”框中勾选“流道曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-173 所示的曲面为流道曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 在“几何”框中勾选“检查曲面”复选框，并单击该按钮，选择如图 5-174 所示的曲面为检查曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“侧刃铣控制面板”对话框。

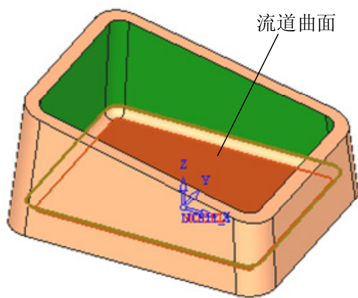


图 5-173 选择流道曲面

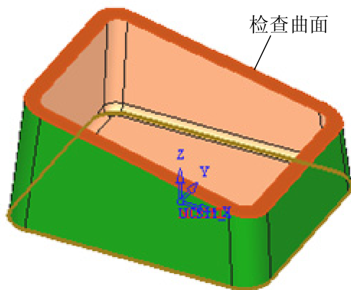


图 5-174 选择检查曲面（2）

- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框（2），如图 5-175 所示。
- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，单击...按钮选择如图 5-176 所示的位置为起点，单击鼠标中键确定。依次单击“确定”按钮返回“侧刃铣控制面板”对话框。
- 选择“连刀”选项卡，设置相关参数如图 5-177 所示，单击“确定”按钮退出“侧刃铣控制面板”对话框。

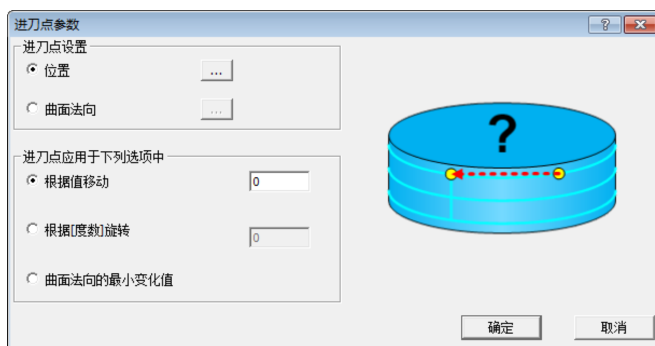


图 5-175　“进刀点参数”对话框（2）

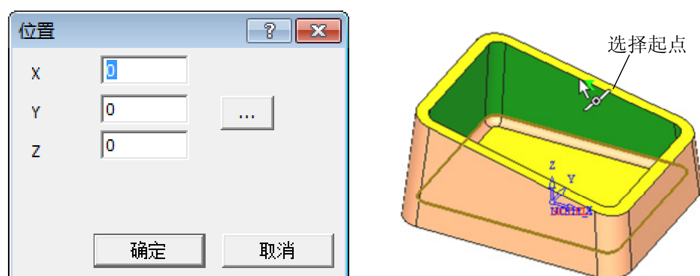


图 5-176　选择起点（2）

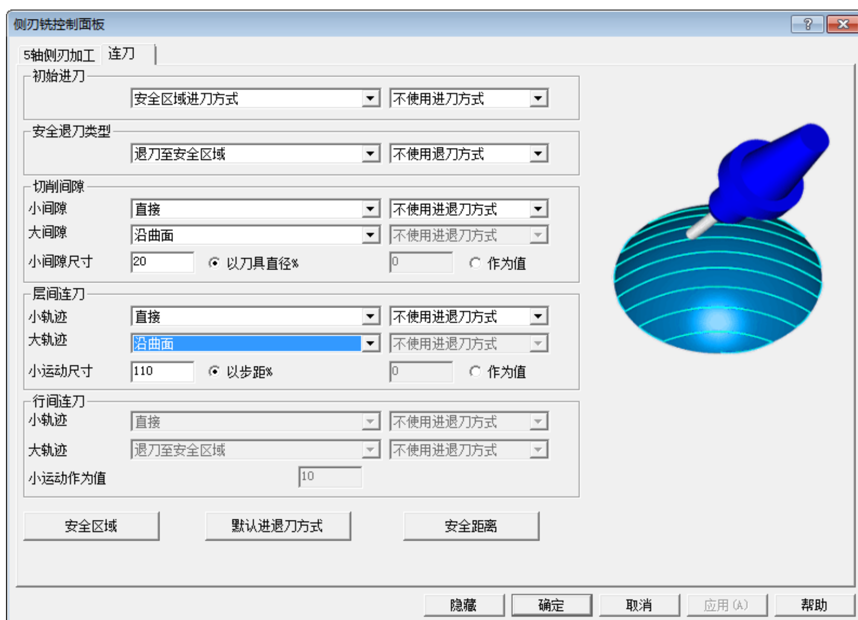


图 5-177　“连刀”选项卡（3）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-178 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-179 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	282.7433
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-178　设置机床参数（4）

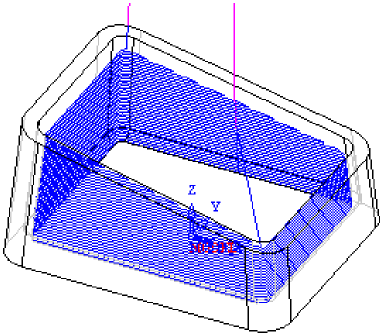


图 5-179　生成的刀具路径（4）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-180 所示。

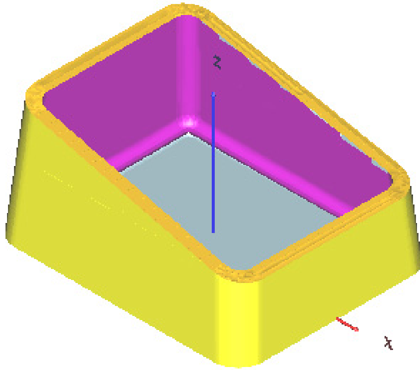


图 5-180　仿真模拟结果（4）

步骤六：航空铣五轴精加工凹腔底面

1）创建程序。单击“加工向导”工具栏上的“加工程序”按钮，弹出“NC Process Manager”对话框（5），“主选择”为“5X 加工”，“子选择”为“航空铣”，如图 5-181 所示。

2）选择刀具。单击“刀具和夹头”按钮，弹出“刀具和卡头”对话框（6），选择 B6 球刀，如图 5-182 所示。

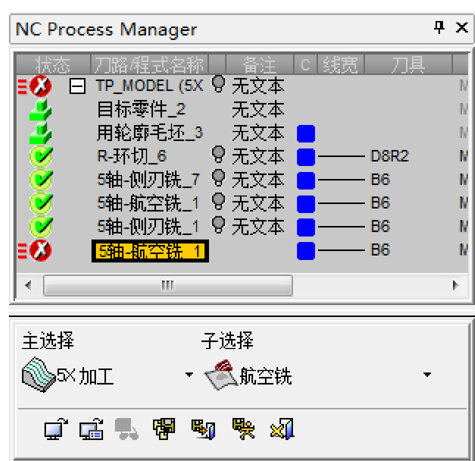


图 5-181　“NC Process Manager”对话框（5）

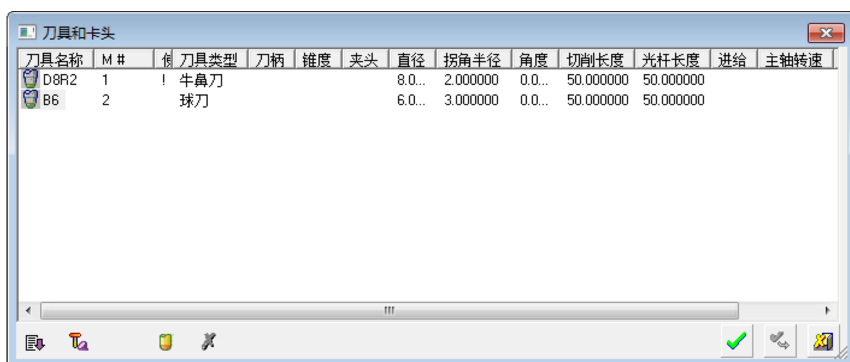


图 5-182　“刀具和卡头”对话框（6）

3）单击“刀路轨迹”后的“进入”按钮，弹出“5X 航空铣控制面板”对话框（2），设置参数如图 5-183 所示。

- 单击“单边曲线”按钮，选择如图 5-184 所示的曲面为控制曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。
- 单击“导动曲面”按钮，选择如图 5-185 所示的曲面为导动曲面，然后单击鼠标中键确定，返回“5X 航空铣控制面板”对话框。
- 勾选“进刀点”复选框，单击该按钮，弹出“进刀点参数”对话框（3），如图 5-186 所示。
- 单击“进刀点设置”对话框中“位置”后的...按钮，弹出“位置”对话框，设置进到点如图 5-187 所示。单击“确定”按钮返回“5X 航空铣控制面板”对话框。

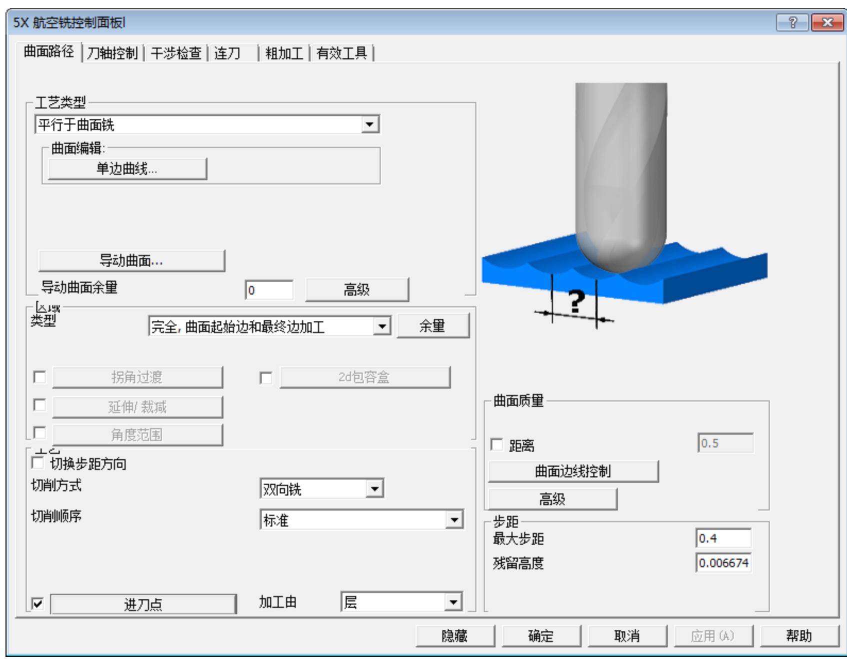
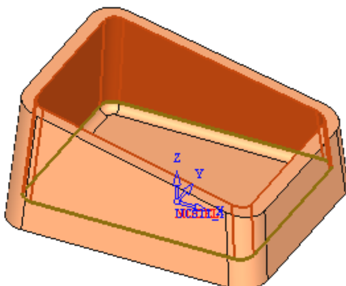


图 5-183 “5X 航空铣控制面板”对话框（2）



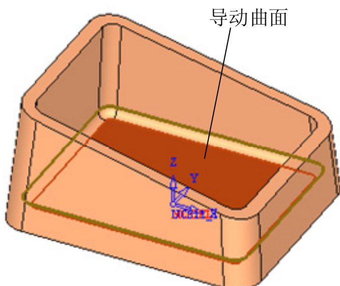


图 5-184 选择控制曲面　　图 5-185 选择导动曲面

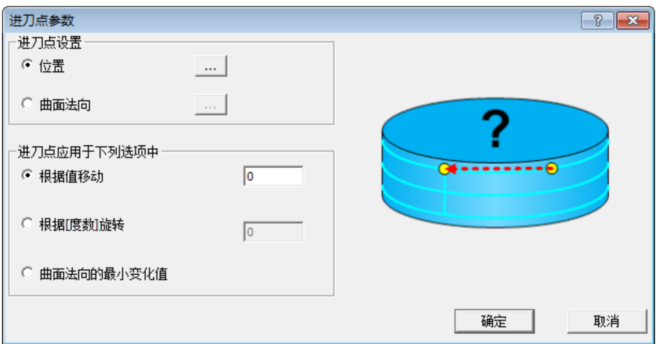


图 5-186 “进刀点参数”对话框（3）

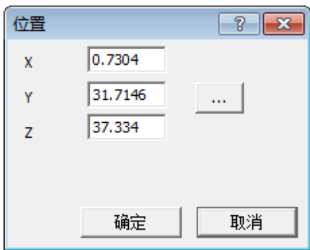


图 5-187 选择起点（3）

● 选择“连刀”选项卡，设置相关参数如图 5-188 所示，单击“确定”按钮退出“5X 航空铣控制面板”对话框。

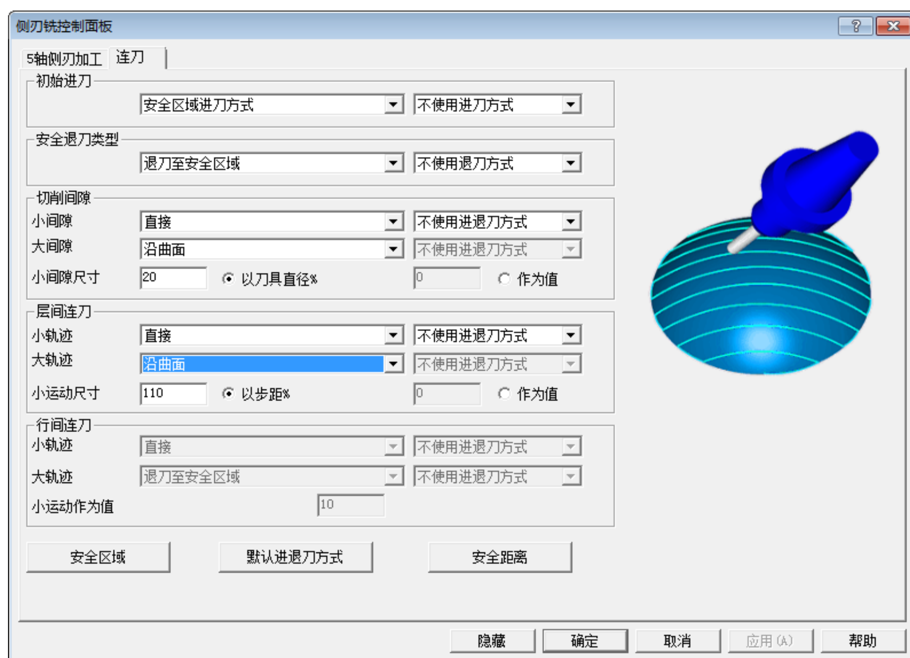


图 5-188　“连刀”选项卡（4）

4）设置机床参数。展开“机床参数”选项，相关参数设置如图 5-189 所示。

5）计算刀具路径。完成参数设置后，单击“NC Process Manager”对话框中的保存并计算按钮，运算当前加工程序；此时图形区显示的刀具路径如图 5-190 所示。

参数	值
机床参数	
Vc(米/分钟)	282.7433
主轴转速	15000
进给(毫米/分钟)	6000.0000
进刀速度 (mm/min)	350.0000
快速退刀	☐
退刀速度 (mm/min)	350.0000
空走刀连接	快速移动
冷却	冷却液关
主轴旋转方向	顺时针

图 5-189　设置机床参数（5）

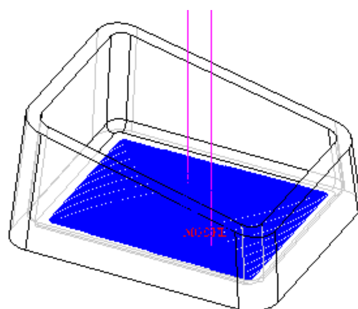


图 5-190　生成的刀具路径（5）

6）仿真模拟。单击“加工向导”工具栏上的“高级仿真”按钮，弹出“高级仿真”对话框，选中所创建的加工，单击确定按钮；在弹出的“Cimatron’s

Verifier”对话框中验证加工效果，如图 5-191 所示。

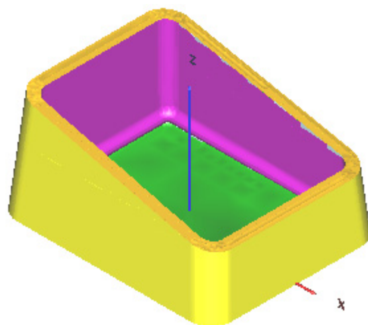


图 5-191 仿真模拟结果（5）

5.3.5 实例总结

本节以倒扣方盒零件为例讲解了 Cimatron E9.0 航空铣五轴加工的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中可以体会到：航空铣是五轴加工的核心方法。它包括了丰富的切削加工策略：平行铣、沿曲线铣、两曲线之间仿形铣、平行于曲线铣、曲线投影铣、两曲面之间仿形铣和平行于曲面铣；同时提供了大量刀轴控制。用户可以通过合理刀轴设置来达到切削加工效果。

参 考 文 献

[1] 王卫兵．高速加工数控编程技术[M]．北京：机械工业出版社，2009．

[2] 何庆．高速加工与数控编程[M]．北京：电子工业出版社，2009．



基础知识够用
实例丰富，讲解透彻，可借鉴性强
学习后可轻松实现从入门到精通

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203
邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

上架指导：工业技术/机械工程/数控技术



ISBN 978-7-111-36683-6
ISBN 978-7-89433-304-9(光盘)
封面设计：马精明

定价：49.00元(含1DVD)